BIBLIOTECA DI SCIENZE FISICHE
MATEMATICHE E NATURALI

LEANDRO SEGALIN

FISICA SPERIMENTALE

AD USO DEGLI ISTITUTI MAGISTRALI SUPERIORI

G. B. PARAVIA & C.

FISICA SE

REGIO ISTITUTO

G. P

LEANDRO SEGALIN

FISICA SPERIMENTALE

AD USO

DEGLI ISTITUTI MAGISTRALI SUPERIORI

PROGRAMMI 7 MAGGIO 1936-XIV

G. B. PARAVIA & C.

TORINO - MILANO - PADOVA - FIRENZE - ROMA - NAPOLI - PALERMO

QUARTA RISTAMPA

PROPRIETÀ LETTERARIA

Stampato in Italia

Soc. An. G. B. PARAVIA & C.
TORINO - Corso Vittorio Emanuele II, n. 199
343 (A) 1942-XX 015334,

INTRODUZIONE

1. Esempi di fenomeni fisici. — Nella scienza è detto *fenomeno* qualunque cambiamento che avviene nei corpi, o nelle loro mutue relazioni. La caduta di una semplice goccia d'acqua, o un avvenimento eccezionale, come un terremoto, un'eclisse, o simili, sono fenomeni

Ci son dei fenomeni che non lasciano alterazioni profonde nei corpi, in modo che questi possono essere riportati al loro stato iniziale con semplici operazioni, azioni meccaniche, riscaldamento o raffreddamento, compressione, ecc. Tali sono la caduta di un corpo, che con semplice azione meccanica si può riportare nella posizione di partenza; l'ebollizione, durante la quale un liquido passa allo stato di vapore, ma il vapore con semplice raffreddamento può ritornare allo stato liquido. Sono questi i *fenomeni fisici*. Invece altre specie di fenomeni lasciano alterazioni profonde, sì che i corpi possono ritornare al loro stato iniziale solo con operazioni laboriose, complicate e costose. Questo si verifica, ad esempio, nella combustione del legno, del carbone, ecc., nell'irrugginirsi di un pezzo di ferro lasciato all'aria umida. Sono questi i *fenomeni chimici*.

La scienza, che è scesa a scrutare con felici risultati l'intima natura dei corpi, pone oggi fra le due categorie di fenomeni esposte, i *fenomeni fisico-chimici*, che partecipano dei caratteri degli uni e degli altri. Le soluzioni, l'elettrolisi, ecc., sono fenomeni fisico-chimici.

2. Rappresentazioni grafiche. — Durante lo svolgimento d'un fenomeno ci sono delle grandezze che variano insieme. Così, per citare qualche esempio, nella dilatazione, o restrizione, che subisce una sbarra di metallo quando viene riscaldata, o raffreddata, variano le grandezze temperatura e lunghezza della sbarra. È logico, anzi è questo lo scopo principale dello studio sperimentale, che lo scienziato investighi se fra le grandezze citate esista una relazione. In tal fenomeno infatti si riscontra che con una grande approssimazione *la variazione di lunghezza subìta dalla sbarra è proporzionale alla variazione di temperatura.* Altro esempio: ognun sa che il moto di un corpo si accelera durante la caduta; ora i Fisici con uno studio accurato del fenomeno hanno trovato che se il corpo cade nel vuoto *l'altezza da cui scende, o, come si dice, lo spazio percorso, è proporzionale al quadrato del tempo impiegato.* Per specificare: un corpo cadente nel vuoto scende nel 1° secondo da 5 m. circa; in 2 secondi da $2^2 \times 5 = 20$ m.; in 3 secondi da $3^2 \times 5 = 45$ m.;... in 10 secondi da $10^2 \times 5 = 500$ m.

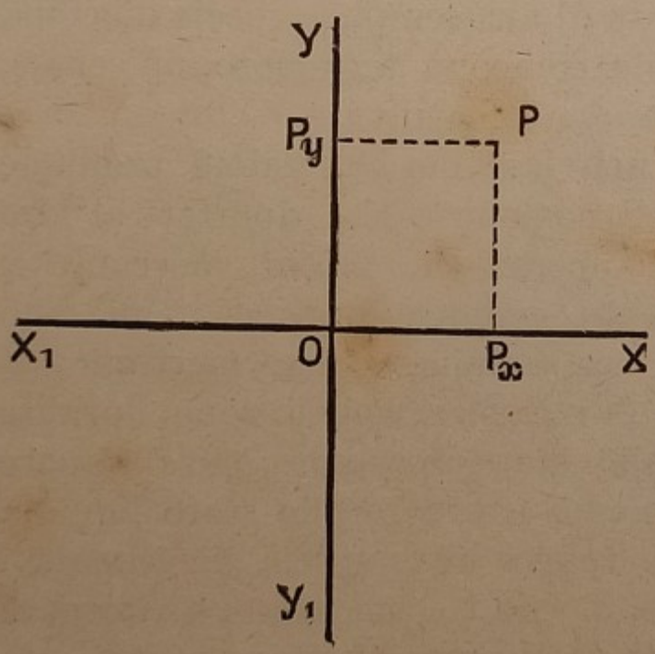


Fig. 1.

Ma molti fenomeni hanno uno svolgimento più complicato e non è possibile enunciare la *legge*, ossia la relazione numerica fra le grandezze che nel fenomeno variano insieme.

In tutti i casi però è sempre possibile dare del fenomeno una *rappresentazione grafica*, che offre del fenomeno una visione completa e immediata.

Per un punto di un piano si traccino due rette perpendicolari passanti per un punto O detto *origine*. Delle due rette chiamiamo la X_1OX, *asse delle ascisse*, la YOY_1, *asse delle ordinate*. Per un punto P del piano tiriamo le perpendicolari agli assi,

i quali siano da esse incontrate nei punti P_x e P_y (fig. 1). Il numero relativo x che misura OP_x è detto *ascissa*, quello y che misura OP_y *ordinata*. Con ciò ad ogni punto P del piano corrisponde una coppia di numeri x e y, ossia una coppia di *coordinate*.

I punti interni all'angolo retto formato dai semiassi OX, OY ritenuti per convenzione positivi hanno ambedue le coordinate positive e quelli interni all'angolo opposto al vertice X_1OY_1 ambedue le coordinate negative. I punti interni all'angolo XOY_1 formato dal semiasse positivo delle ascisse e dal semiasse negativo delle ordinate hanno l'ascissa x positiva, e l'ordinata y negativa; quelli dell'angolo YOX_1 opposto al vertice hanno la x negativa e la y positiva.

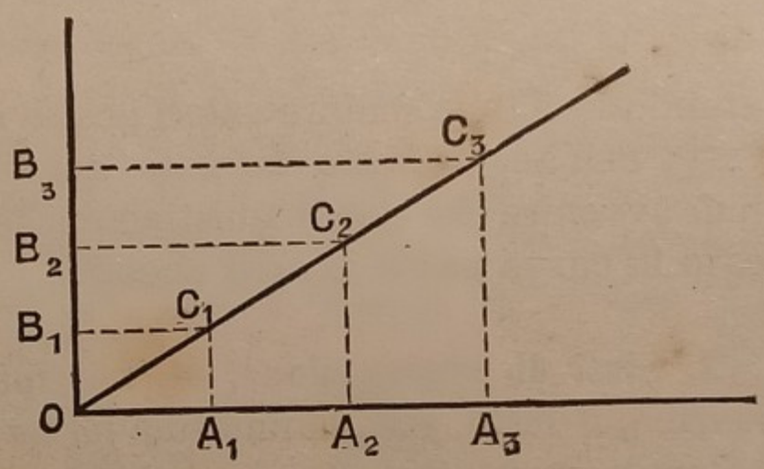


Fig. 2.

Si abbiano ora due grandezze A e B fra le quali esista una legge di dipendenza, o, come dicono i matematici, la A sia *funzione* della B che è detta *variabile*. Supponiamo che l'esperienza ci abbia date le due serie corrispondenti di valori a_1, a_2, a_3,...; b_1, b_2, b_3,... delle grandezze A e B. Allora segniamo i punti del piano P_1, P_2, P_3,... aventi per coordinate le coppie a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3... Se sarà il caso, si segneranno anche altri punti intermedi, e si traccerà la linea che li comprende. Questa linea è detta *diagramma* del fenomeno.

Così operando per la dilatazione della sbarra, OA_1, A_1A_2, A_2A_3... (fig. 2) rappresentano degli intervalli di temperatura, per esempio, da 0° a 10°, da 10° a 20°, da 20° a 30°,... e OB_1, B_1B_2, B_2B_3,... rappresentano i corrispondenti allungamenti subìti dalla sbarra, che, come si sa, sono proporzionali alle variazioni della temperatura. I punti ottenuti C_1, C_2, C_3,... sono manifestamente sopra una retta OZ.

Nella figura 3 è rappresentato il moto di caduta di un corpo pesante nel vuoto: OA_1, OA_2, OA_3,... rappresentano i tempi, 1, 2, 3... secondi; OB_1, OB_2, OB_3,... che stanno fra loro, per la legge sopra enunciata, come 1 : 4 : 9 : ... rappresentano i rispettivi spazi percorsi. I punti C_1, C_2, C_3,... stanno sopra una curva OZ (parabola). Negli esempi citati le due grandezze hanno sempre valori positivi, quindi la curva si trova tutta nell'angolo retto formato dai due semiassi positivi, ma può avvenire che esse acquistino anche valori negativi, nel qual caso la curva passa in altri angoli.

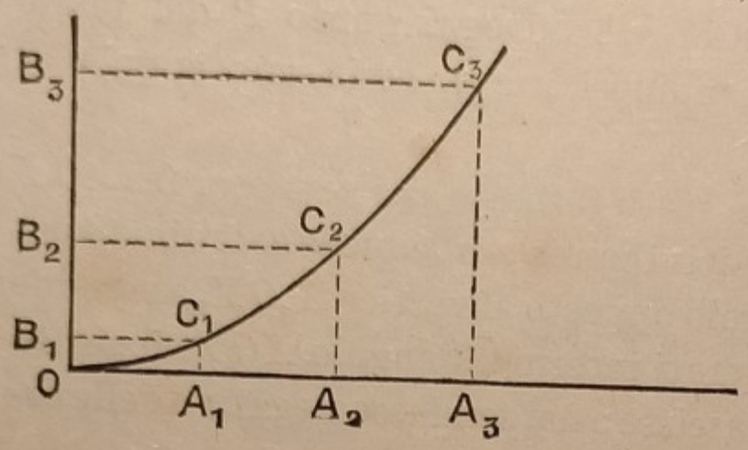


Fig. 3.

3. Stati di aggregazione. — I corpi *solidi*, quali il legno, il marmo, il ferro, ecc., hanno una *forma determinata* e oppongono notevole resistenza a un cambiamento di forma. Si ammette che le loro molecole siano legate mutuamente da una forza detta *coesione*, molto grande: infatti per rompere un filo d'acciaio della sezione di 1^{mm^2} occorre una forza di trazione di circa 70 kg.

I corpi *liquidi*, quali l'acqua, l'alcool, il vino, hanno le loro particelle che scorrono facilmente le une sulle altre e *non hanno una forma propria*, ma ricevono la forma del recipiente.

I *gas* o *aeriformi* hanno molecole mobilissime e *apparentemente* senza coesione; essi riempiono sempre tutto il vaso che li contiene, senza raccogliersi sul fondo come fanno i liquidi.

Uno stesso corpo, pur conservando la sua natura chimica può presentarsi sotto i tre stati: lo zolfo, che d'ordinario è solido, riscaldato diventa liquido, e riscaldato ancor più, bolle e si converte in vapore; così l'acqua, che vediamo comunemente liquida, non di rado la si ha allo stato di ghiaccio o di vapore. L'aria stessa, convenientemente raffreddata, diventa liquida e anche solida.

Si noti ancora che fra i solidi e i liquidi esistono altri corpi, così detti pastosi, quali il vischio, un impasto di argilla con acqua ecc. Ed esistono anche corpi nè ben liquidi nè ben gassosi, detti corpi allo *stato critico*; non sono tanto comuni, ma si possono preparare con adatte operazioni di laboratorio. Il nucleo del Sole sarebbe fra questi.

4. Proprietà generali della materia. — Sono proprietà generali a tutti i corpi; ci limiteremo a dire brevemente delle seguenti:

a) Estensione. — Ogni corpo è esteso, cioè occupa una porzione di spazio, che si chiama il suo *volume*. Ma oltre il volume occorre spesso considerare l'estensione di un corpo in *lunghezza* e in *superficie*. L'unità fondamentale per la misura delle dimensioni di un corpo è il *metro*, che, a parte la sua origine, è la lunghezza che, a zero gradi di temperatura, hanno delle sbarre formate con una lega di platino e iridio, che si trovano nell'Ufficio internazionale di Pesi e Misure di Sèvres. Le sbarre hanno un profilo ad X (fig. 4) per conciliare la leggerezza con la rigidità. Sono noti i multipli e sottomultipli usuali del metro; meno noti i seguenti sottomultipli: il *micron* = 1 millesimo di millimetro e il *micromillimetro* = 1 milionesimo di millimetro. Questi sottomultipli hanno rispettivamente i simboli μ e $m\mu$. Si usano per la misura di lunghezze estremamente piccole, come le lunghezze d'onda nell'Ottica.

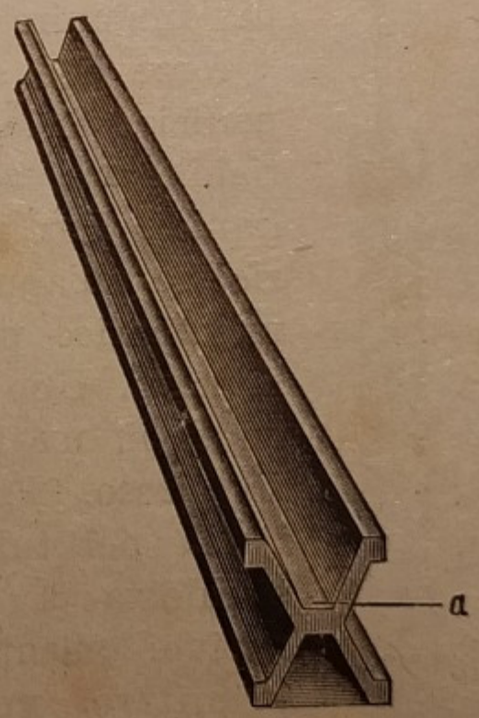


Fig. 4.

Per le superficie e per i volumi si usano corrispondentemente il metro quadrato (m^2) e il metro cubo (m^3) coi rispettivi multipli e sottomultipli.

Nella Fisica, come si vedrà, le unità sono il centimetro lineare (cm), il centimetro quadrato (cm^2) e il centimetro cubo (cm^3).

b) Divisibilità. — Un corpo può esser diviso in particelle piccolissime; ciò apparisce in molte polveri dette impalpabili;

l'oro può ridursi in foglie dello spessore inferiore a $^1/_{50}$ di micron; qualche milligrammo di fucsina colora in rosso parecchi litri d'acqua; le sostanze odoranti si dividono anche in particelle estremamente piccole, tanto che secondo le ricerche di Berthelot 1 grammo di muschio perderebbe 1 milligrammo di peso in 100 mila anni. Ma una divisibilità anche più grande è stata concepita nella Elettricità e se ne parlerà in un capitolo relativo alla costituzione della materia.

c) Compressibilità - Porosità - Elasticità. — Si ritiene che tutti i corpi sieno formati di particelle estremamente piccole, dette *molecole*, che conservano tutte le proprietà del corpo. Pare che le molecole non siano a contatto. Infatti ogni corpo si contrae quando lo si comprime mediante un'azione meccanica qualsiasi o quando lo si raffredda; la diminuzione di volume è da attribuirsi alla diminuzione degli intervalli intermolecolari. In modo particolare è detta *compressibilità* la proprietà di tutti i corpi di diminuire di volume quando sono assoggettati a forze che agiscono su tutti i punti della loro superficie. Tale proprietà, rilevantissima nei gas, variabile nei corpi solidi, è praticamente nulla nei liquidi. Per provare la compressibilità dei gas, si ricorre all'apparecchio della figura 5, detto acciarino pneumatico per la ragione che si vedrà nella Termologia. Uno stantuffo di cuoio ingrassato è impegnato in un tubo di vetro, a pareti robuste, chiuso in basso. Premendo sullo stantuffo questo si affonda nel tubo; l'aria sottostante vien compressa, e ridotta a una piccola frazione del volume primitivo; allentando la pressione l'aria riprende il primitivo volume e caccia in alto lo stantuffo.

Fig. 5.

Si dice comunemente che i gas sono anche dotati di espansione o di *espandibilità*, cioè hanno la proprietà di aumentare indefinitamente il loro volume e di occupare sempre completamente il recipiente che li contiene.

Si dimostra la espandibilità di un gas ponendo sotto la

campana di una macchina pneumatica (fig. 6) una vescica contenente un po' d'aria, che nelle condizioni ordinarie lascia la vescica floscia. Facendo il vuoto nella campana, cioè diminuendo la pressione che l'aria della campana esercita sulla vescica, questa si gonfia per l'espansione dell'aria interna. Fatta rientrar l'aria nella campana, la vescica si affloscia di nuovo in causa del sopravvenuto aumento di pressione.

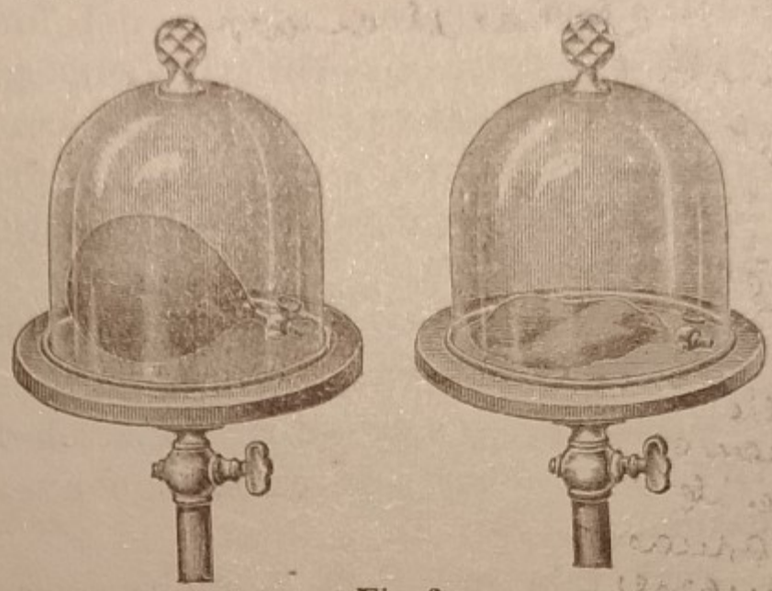


Fig. 6.

Gli intervalli intermolecolari di cui poco prima è stato detto, sono detti *pori fisici*, hanno dimensioni ultramicroscopiche e non vanno confusi con gli intervalli che spesso appariscono visibili nei corpi, come avviene nella carta da filtro, nella pomice, nello zucchero; questi ultimi vengono detti *pori sensibili* e se ne trae profitto per la *filtrazione*.

Per tale operazione si usano i *filtri*. Nei laboratori questi sono formati spesso con la così detta *carta da filtro*, che è carta

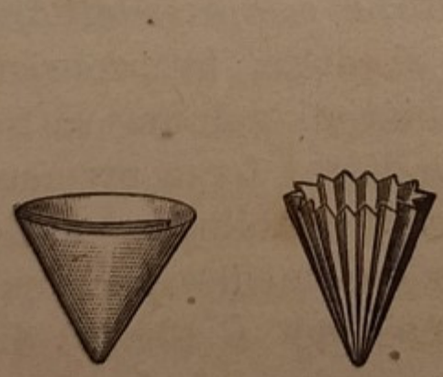


Fig. 7.

Fig. 8.

senza colla. La carta viene piegata sì da formare una specie di serbatoio conico poggiato entro un imbuto di vetro (fig. 7). Nel filtro si versa un liquido che contenga in sospensione delle piccolissime particelle che lo rendono torbido.

Il liquido passa attraverso i forellini della carta (fig. 8), le particelle solide rimangono nel filtro, sia perchè possono avere dimensioni superiori ai fori del filtro, sia per l'attrazione esercitata dalle fibre del filtro sulle particelle stesse. A questo proposito è stato osservato che con filtri fatti di lamine di porcellana porosa, i cui pori non arrivano a 30 μ, venivano trattenuti dei microrganismi che non arrivavano a 1 μ di diametro.

Tutti i corpi sono *elastici*, ossia dopo essere stati deformati o ridotti di volume mediante un'azione meccanica qualunque, mostrano la tendenza a riprendere la forma o il volume primitivo quando cessa la causa che aveva prodotto tale modificazione.

Però tale proprietà è molto accentuata in alcuni corpi, che perciò si chiamano senz'altro *elastici*, come nel vetro, nell'acciaio, ecc.; in altri è poco accentuata, per esempio nel piombo; questi ultimi corpi si dicono perciò comunemente *anelastici*.

d) Dilatabilità. — Tutti i corpi, riscaldati, raffreddati o sottoposti a speciali sforzi meccanici, cambiano di volume.

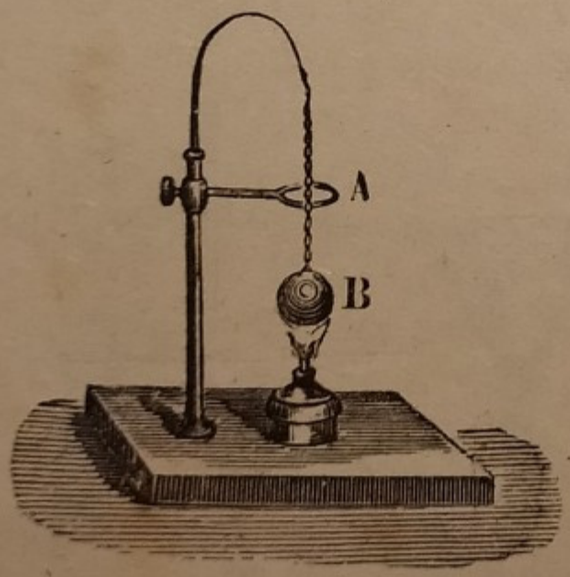


Fig. 9.

E in particolare chiamasi *dilatabilità* la proprietà dei corpi di cambiar di volume per effetto di riscaldamento o raffreddamento, e *compressibilità*, come già si disse, la proprietà di cambiar di volume sotto l'azione di una forza premente.

La dilatabilità è messa in vista con facili esperimenti:

Una sfera *B* (fig. 9) di metallo passa a freddo appena appena attraverso un anello metallico *A*; scaldata, la sfera non passa più e rimane appoggiata sull'anello. Dopo qualche tempo però la sfera vi torna a passare per la contrazione dovuta al raf-

freddamento e un po' anche per un leggero allargamento dell'anello dovuto al calore che la sfera gli ha comunicato.

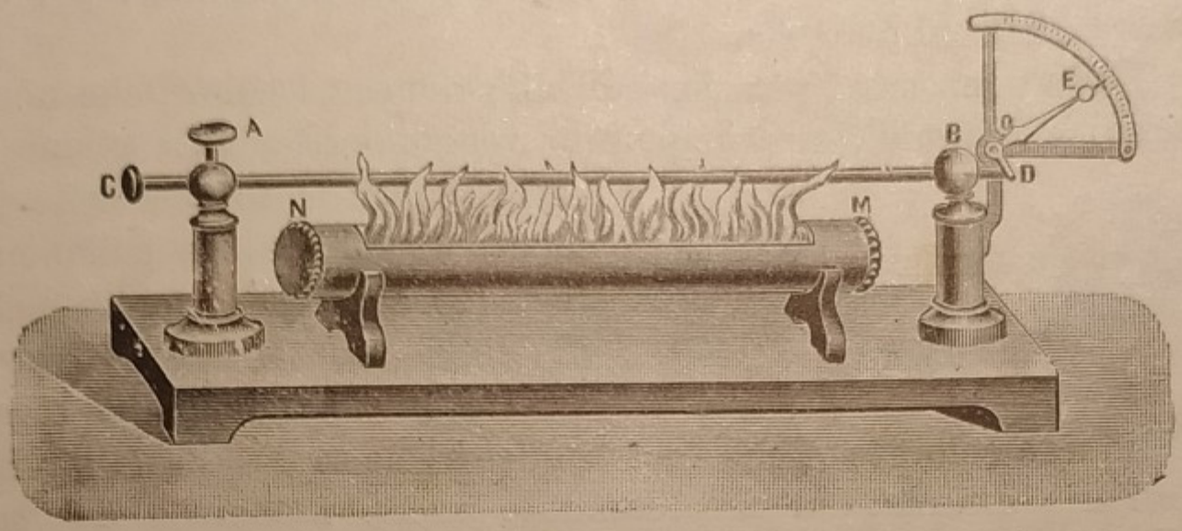


Fig. 10.

Una sbarra metallica *C* (fig. 10), disposta in posizione orizzontale, ha l'estremo di sinistra fissato in una morsetta; l'estremo di destra libero poggia contro una leva *DOE*, la cui estremità libera fa da indice in corrispondenza di un arco diviso. Si osserva la divisione iniziale sulla quale si trova l'indice; riscaldando la verga in qualche modo, ad esempio, ponendovi sotto una serie di fiammelle a gas, si osserva che l'indice si muove sull'arco diviso mostrando che l'asta si allunga. Spenta la fiamma, l'indice ritorna al punto di partenza.

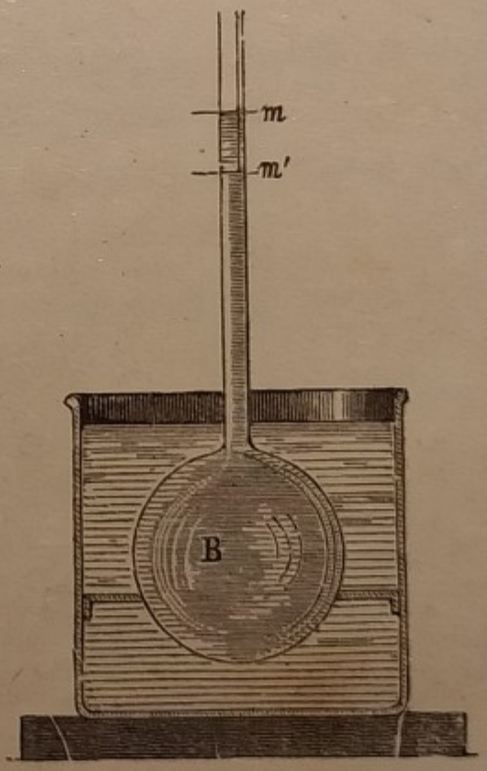


Fig. 11.

Un palloncino di vetro (fig. 11), è unito a un tubo piuttosto stretto e lungo, e il liquido, ad es. alcool colorato, che riempie il palloncino, arriva nel cannello a un punto *m*, che viene in qualche modo segnato sul cannello. Immergendo bruscamente il palloncino nell'acqua ben calda, il livello del liquido si abbassa prima sino a un punto *m'*, poi sale e oltrepassa la

posizione di partenza. Il calore dapprima dilata il recipiente, perciò il liquido scende per l'aumentata capacità di questo; in seguito il calore passa al liquido, che dilatandosi più del vetro, sale nel cannello.

I gas sono assai più sensibili all'azione del calore che non i solidi e i liquidi, sicchè quando vengono riscaldati si può in essi riscontrare un notevole aumento di volume. Un palloncino (fig. 12) è unito a un cannello di vetro orizzontale piuttosto stretto, in cui si pone una goccia di liquido colorato *A* che fa da indice e che separa l'aria interna dall'aria esterna. Col riscaldamento anche moderato del palloncino, ottenuto appoggiandovi sopra il palmo della mano, si osserva che l'indice liquido si muove notevolmente nel cannello verso l'esterno.

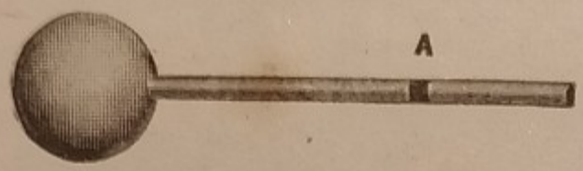


Fig. 12.

A A' A'' A'''

linee della traiettoria del moto, abbiamo
con l'moto rettilineo circolare

A - A''' spazio percorso s intendiamo
la lunghezza della traiettoria percorsa

MECCANICA

Il movimento è il fenomeno fisico per eccellenza; tutti i fenomeni fisici son dovuti a movimenti dei corpi o delle loro particelle.

La *Meccanica*, ossia la Scienza del moto, si divide in tre parti:

la *Cinematica*, che studia il moto dei corpi, indipendentemente dalle cause che lo producono e lo modificano;

la *Statica*, che studia le cause del moto in condizioni da elidersi nei loro effetti;

la *Dinamica*, che si occupa del movimento in relazione con le cause che lo producono.

Cinematica.

5. Traiettoria. — Per semplificare il nostro studio cominceremo a considerare il moto di un corpo avente dimensioni estremamente piccole, cui daremo il nome di *punto materiale*.

Tale punto movendosi genera nello spazio una linea, detta *traiettoria*, e a seconda della forma di questa distinguiamo il moto in *rettilineo* e *curvilineo*. Quest'ultimo, a seconda della natura specifica della curva, potrà suddistinguersi in moto *circolare*, *ellittico*, *parabolico*, ecc.

6. Moto uniforme e vario - Moto uniformemente vario. — Lo scopo principale della cinematica è la ricerca delle *leggi* dei vari moti, ossia della relazione fra lo *spazio* percorso dal mobile e il *tempo* impiegato a percorrerlo. La parola *spazio* usata in cinematica significa la porzione di traiettoria percorsa dal mobile in un certo tempo, e si intenderà misurato in centimetri, a meno che non se ne faccia una particolare dichiarazione.

Per la misura della durata dei fenomeni fisici si usa di solito il *secondo*, cioè il minuto secondo di *tempo medio*. È la 86400ma parte del *giorno solare medio*.

Il moto si dice *uniforme* se il mobile percorre *spazi eguali in tempi eguali comunque piccoli*. La legge del moto uniforme è per conseguenza questa: *gli spazi percorsi sono proporzionali ai tempi impiegati a percorrerli*. Perciò indicando con s lo spazio percorso dal mobile in un tempo t, avremo:

$$s = kt$$

dove k è un numero costante per un determinato moto.

Tale costante si chiama *velocità* di quel dato moto uniforme e di solito lo si indica nei trattati di Fisica colla lettera v, sicchè la detta formola si scrive più spesso così:

$$s = vt,$$

dalla quale si ricava:

$$v = \frac{s}{t};$$

perciò la velocità in un dato moto uniforme è *lo spazio percorso dal mobile in un secondo*.

Qualunque moto non uniforme si dice *vario*. In generale i moti che riscontriamo in natura, come quelli prodotti ad arte, sono moti vari.

Nel moto vario non si può definire la velocità come nel moto uniforme, poichè lo spazio percorso nelle singole unità di tempo è variabile. Una grandezza che nel moto vario può, fino ad un certo punto, equipararsi alla velocità nel moto uniforme, è la *velocità media*, e precisamente si definisce *velocità media durante un certo tempo t*, o nell'intervallo $AB = s$ percorso

nel tempo t, il rapporto fra lo spazio e il tempo impiegato a percorrerlo. Indicandola con v_m avremo per definizione:

$$v_m = \frac{s}{t}.$$

Così quando si dice che un determinato treno cammina alla velocità di 50 km. all'ora, si vuol indicare la velocità media del treno, che si ottiene dividendo la distanza chilometrica fra le due stazioni estreme per il numero delle ore che dura il percorso.

Nella Cinematica, però, più importante è la così detta *velocità all'istante*, che preciseremo come segue.

Il mobile percorra con moto qualunque la retta XY (fig. 13), nel senso della freccia e passi per O nell'istante *zero*, ossia

Fig. 13.

nell'istante da cui con un cronometro si conta il tempo; dopo t secondi il mobile si trovi in A. Consideriamo lo spazio AB percorso successivamente dal mobile in un tempo τ; il rapporto $\frac{AB}{\tau}$ misura la velocità media fra A e B. Or se AB è molto piccolo, si può ritenere che il mobile percorra tale spazio con moto uniforme, perciò si è convenuto di chiamare il rapporto fra lo spazio AB e il tempo τ impiegato a percorrerlo col nome di *velocità all'istante in cui il mobile è in A* o anche *velocità all'istante t, o al tempo t*, cioè alla fine della t^{ma} unità di tempo trascorsa dall'istante zero.

Questa velocità la indicheremo coi simboli v_A o v_t, leggendo velocità in A o all'istante t. Analogamente si indicherà con v_0 la velocità all'istante zero.

Or se in un dato moto riscontriamo che la velocità all'istante zero è, ad esempio, 5^{cm} al secondo, e dopo 1 secondo è 7^{cm}, dopo 2 secondi 9^{cm}, dopo 3 secondi 11^{cm}, ecc., se cioè la velo-

cità all'istante *subisce un aumento costante ad ogni unità di tempo*, il moto si dice *uniformemente accelerato*. Se, all'opposto, si riscontrerà che la velocità all'istante *diminuisce* di una quantità costante ad ogni unità di tempo, avremo il moto *uniformemente ritardato*. L'uno e l'altro dei due moti si comprendono sotto il nome di *moto uniformemente vario*. Per quanto si è detto, indicata con v_o la velocità del mobile all'istante zero, che è anche detta velocità *iniziale*, la velocità v_t all'istante t verrà data dalla formola:

$$v_t = v_o \pm at, \qquad (1)$$

nella quale è indicata con a la così detta *accelerazione*, che in generale è l'*aumento* o la *diminuzione della velocità all'istante in 1 secondo*. Il moto uniformemente vario si può quindi anche definire il moto in cui si ha un'accelerazione — positiva o negativa — costante.

Con un procedimento, che per l'indole elementare di questo libro non possiamo sviluppare, si viene a dimostrare che lo spazio s_t percorso dal mobile nel tempo t, quando rimangono fisse le condizioni sopra stabilite, è dato dalla seguente formola:

$$s_t = v_o t \pm \frac{1}{2} at^2 . \qquad (2)$$

Nel caso di un moto uniformemente accelerato, con velocità iniziale zero, le formole (1) e (2) diventano:

$$v_t = at \qquad (1)'$$

$$s_t = \frac{1}{2} at^2 . \qquad (2)'$$

Questo moto speciale è stato chiamato da Galileo *moto naturalmente accelerato*, poichè lo si riscontra talvolta in natura; tale per esempio, come si vedrà, è il moto di caduta dei corpi.

Le formole (1)′ e (2)′ contengono evidentemente le seguenti leggi, che dicono che nel moto naturalmente accelerato:

1° *la velocità è proporzionale al tempo;*

2° *lo spazio è proporzionale al quadrato del tempo impiegato a percorrerlo.*

7. Composizione dei movimenti. — Un corpo fa sempre parte di un sistema in moto. I corpi terrestri fanno parte di un sistema, la Terra, che è animata da più movimenti e in particolare da un moto attorno al Sole, il quale a sua volta col corteo dei pianeti, si muove nello spazio. Perciò un corpo che si muove alla superficie terrestre è contemporaneamente soggetto anche ad altri moti; e un problema importante che si presenta è di tracciare la traiettoria percorsa effettivamente dal corpo nello spazio, ossia determinare il *moto risultante.* È il problema della *composizione dei movimenti*, la cui risoluzione è facilitata dal *Principio di Galileo*, che, come altri postulati della meccanica, è di origine sperimentale. Il principio prende anche il nome di *Principio della indipendenza dei movimenti* e si può enunciare così: *la posizione di un punto soggetto a diversi movimenti contemporanei è in qualunque istante quella che esso occuperebbe se i diversi moti avvenissero separatamente l'un dopo l'altro per la durata medesima.*

Qualche esempio: un corpo viene lanciato verticalmente dall'alto in basso. Esso per la legge d'inerzia (20) tende a muoversi con moto uniforme di modo che se non fosse pesante percorrerebbe nelle singole unità di tempo gli spazi eguali O_1A_1, A_1B_1, B_1C_1 . . . (fig. 14 *a*). Se non venisse lanciato ma venisse semplicemente abbandonato a se stesso, per effetto della gravità percorrerebbe con moto naturalmente accelerato (6) nelle successive unità di tempo gli spazi O_2A_2, A_2B_2, B_2C_2 ... (fig. 14 *b*) che stanno fra loro come i quadrati dei tempi. Ora, poichè il corpo viene lanciato ed è contemporaneamente soggetto alla gravità, gli spazi effettivamente percorsi nelle singole unità di tempo sono la somma degli spazi che verrebbero separatamente percorsi per effetto del lancio e della gravità, cioè sono: nel 1° secondo $O_3A_3 = O_1A_1 + O_2A_2$; nel 2° secondo $A_3B_3 = A_1B_1 + A_2B_2$; nel 3° secondo $B_3C_3 = B_1C_1 + B_2C_2$; ... (fig. 14 *c*).

Altrettanto facile riesce a trovare il moto risultante di due moti componenti, uno uniforme e l'altro naturalmente accele-

ratò, effettuantisi nella stessa direzione ma in versi opposti. È il caso di un corpo lanciato verticalmente dal basso in alto.

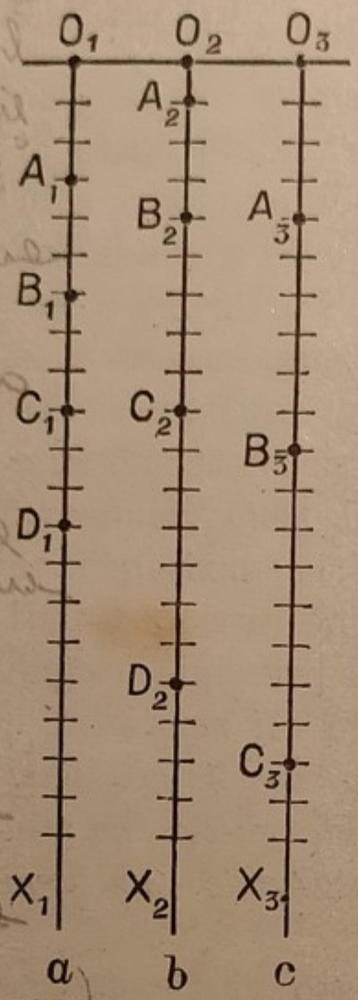


Fig. 14.

Ci serviremo anche qui della figura 15, tracciata col criterio della precedente. Su O_1X_1 è rappresentato il moto componente uniforme dal basso all'alto dovuto al lancio; su O_2X_2 quello naturalmente accelerato dovuto alla gravità che si effettua in senso contrario, cioè dall'alto al basso; su O_3X_3 il moto risultante, nel quale gli spazi percorsi nelle singole e successive unità di tempo sono la differenza fra gli spazi rispettivi nei moti componenti. È cioè $O_3A_3 = O_1A_1 - O_2A_2$; $A_3B_3 = A_1B_1 - A_2B_2$; $B_3C_3 = B_1C_1 - B_2C_2$; $C_3D_3 = C_1D_1 - C_2D_2$. Si osservi che date le relazioni di lunghezza rappresentanti nella figura gli spazi componenti, C_3D_3 è negativo essendo $C_1D_1 < C_2D_2$ e a maggior ragione risulterebbero negativi gli spazi percorsi nelle unità di tempo successive. Il moto risultante per un certo tempo si effettua in salita, il mobile raggiunge la massima altezza, e poi discende.

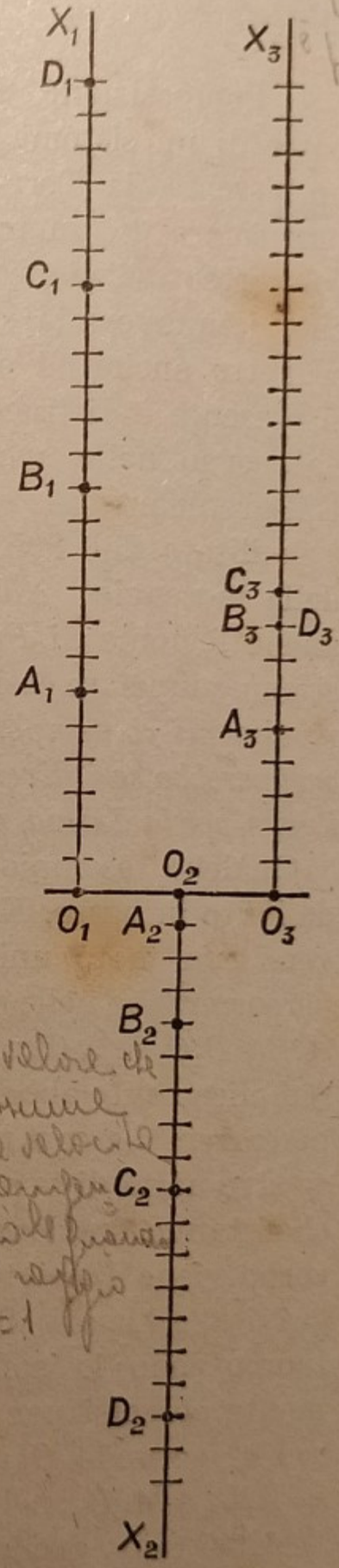


Fig. 15.

Più complessa è la questione per due moti componenti aventi direzioni diverse, ma si può sempre determinare con faci-

lità la posizione occupata a un istante qualunque nel moto risultante. Consideriamo un solo caso che, salvo differenze dovute a cause che non possono qui essere prese in considerazione, si verifica spesso: quello di un proiettile lanciato in una direzione non verticale.

Il proiettile è lanciato nella direzione OZ (fig. 16), sulla quale i segmenti eguali OA_1, A_1B_1, B_1C_1... rappresentano gli spazi relativi alle singole unità di tempo del moto componente uniforme dovuto al lancio, e sulla direzione verticale YOY_1 sono segnati i segmenti OA_2, A_2B_2, B_2C_2... rappresentanti i rispettivi spazi del moto componente naturalmente accelerato dovuto alle gravità.

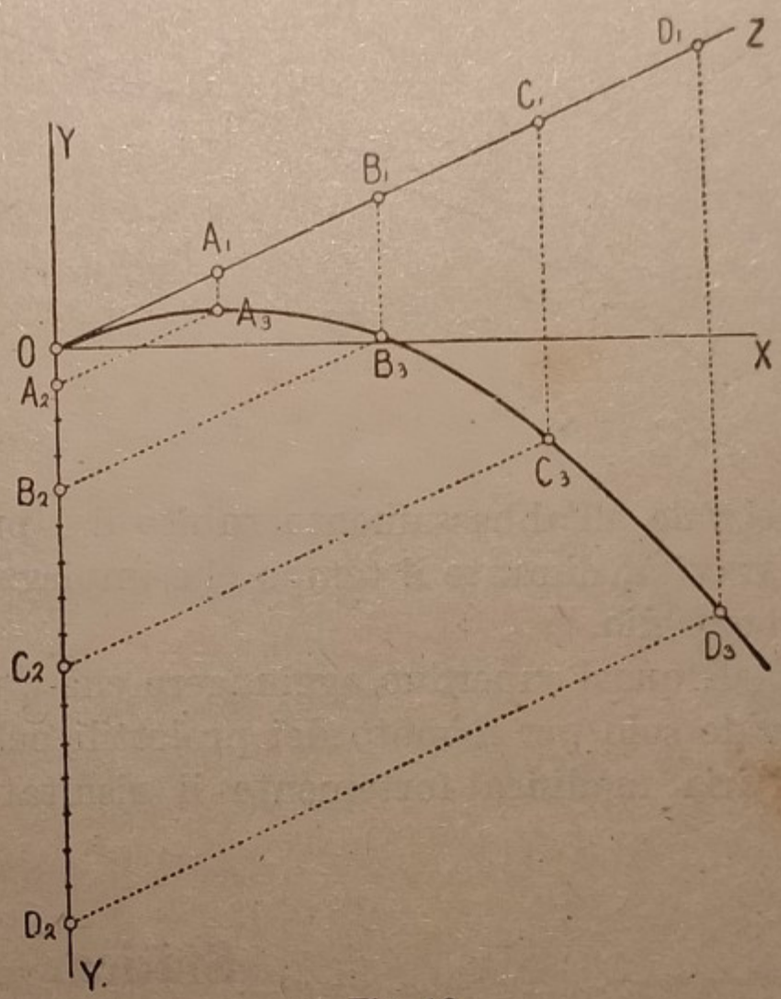


Fig. 16.

In base al principio di Galileo, la posizione occupata dal proiettile dopo 1 secondo è A_3, perchè dopo 1 secondo, obbedendo al moto lungo la OZ si troverebbe in A_1, e da qui dopo 1 secondo, obbedendo alla gravità, passerebbe in A_3 percorrendo $A_1A_3 = OA_2$. Analogamente dopo 2 secondi si trova in B_3, dopo 3 secondi in C_3... Il proiettile segue la curva parabolica che comprende quei punti.

Questa discussione rende ragione della necessità dell'*alzo* nelle armi da fuoco. Se, ad es., con un fucile M (fig. 17) un tiratore si propone di colpire un determinato punto A del bersaglio, egli deve *prender la mira*, cioè disporre il fucile in modo che il punto da colpire A si trovi allineato con l'occhio O,

coll'estremità C dell'alzo e col mirino N. In tal modo l'asse dell'arma incontra il bersaglio in un punto B che sta verticalmente sopra il punto A; il proiettile descrive la parabola NHA e perchè il punto A venga colpito è necessario che BA sia

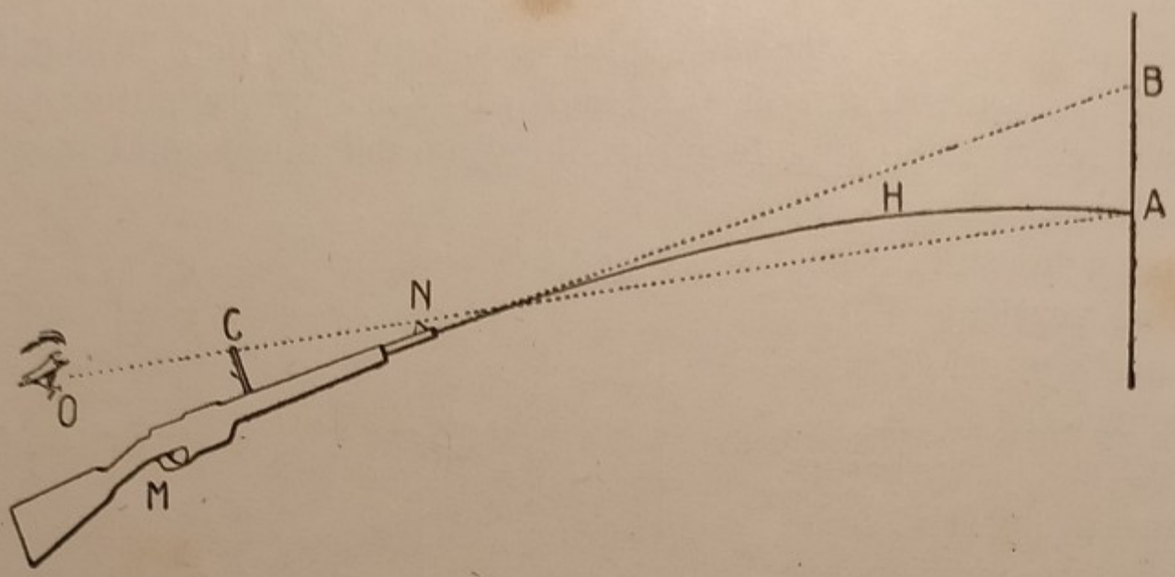


Fig. 17.

eguale all'abbassamento subito dal proiettile per effetto della gravità, durante il tempo che impiega per andare dal fucile al bersaglio.

È quasi superfluo aggiungere che quanto è stato sopra detto vale solo per il moto dei proiettili nel vuoto; la presenza dell'aria modifica fortemente il risultato finale.

Statica.

8. Concetto di forza; equilibrio; unità statica di forza. — È detta *forza qualunque causa capace di modificare lo stato di quiete o di moto di un corpo*. La gravità è la forza che fa cadere i corpi; lo sforzo che un essere vivente esercita per spingere o per tirare un corpo, la pressione del vapore contro lo stantuffo d'una macchina, l'attrazione di una calamita sopra un pezzo di ferro e simili, sono delle forze.

In una forza occorre distinguere: 1° il *punto di applicazione*, ossia il punto sul quale agisce la forza; 2° la *direzione*, che è la direzione della retta su cui il corpo tende a muoversi sotto

l'azione della forza; 3° il *senso* o *verso*, che è il senso o verso del moto che il corpo tende ad acquistare; 4° l'*intensità*, ossia la grandezza della forza, che è misurata dalla grandezza dell'effetto prodotto.

Per precisare tali elementi, consideriamo la forza di gravità. Un corpo *A* (fig. 18) è attaccato per il punto *B* ad un filo *C* molto flessibile, fissato all'estremo superiore *O*. Si osserva che, dopo alcune oscillazioni, il corpo si mette in riposo e il filo prende nello spazio una direzione determinata. Or è evidente che un filo flessibile prende sempre la direzione della forza che lo sollecita; dunque nel caso che contempliamo la *direzione* del filo segna la *direzione* della forza di gravità agente sul corpo.

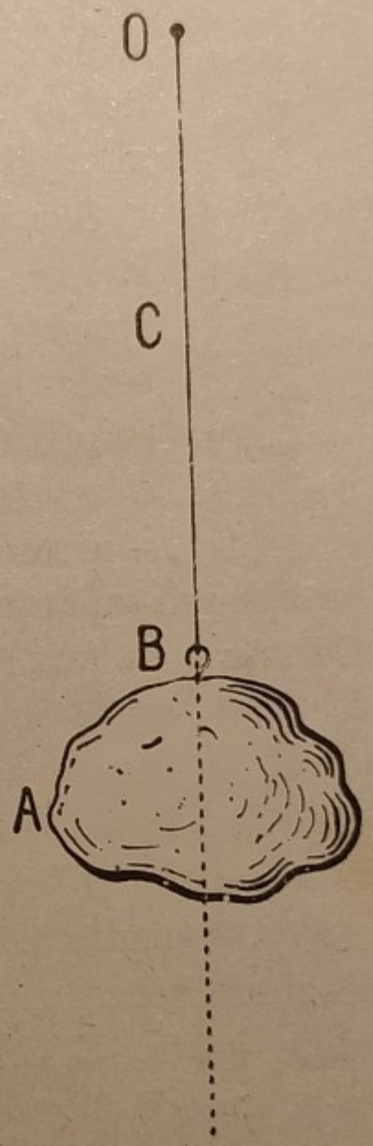


Fig. 18.

È facile riscontrare che il filo si dispone *verticale*, ovverosia perpendicolare alla superficie delle acque stagnanti e la sua direzione passa approssimativamente per il centro della Terra.

Perciò diremo che la gravità è una forza *verticale*, il cui senso è *dall'alto al basso*. Nel caso ora contemplato, riguardo al punto di applicazione della forza, potremo ritenere che esso sia il punto *O* o il punto *B*; ma per ragioni che verranno dilucidate in seguito, riterremo come punto di applicazione un altro punto giacente sulla direzione *OB*, che ha particolari caratteri (14). Il punto di applicazione di una forza è in generale indeterminato, e si può considerare come tale un punto qualunque della sua direzione.

Notiamo infine che un corpo sospeso ad un filo flessibile, com'è quello della precedente figura, costituisce il così detto *filo a piombo* o *piombino*, al quale praticamente si dà la forma della figura 19; esso segna la verticale che passa per il suo punto di sospensione, ed ha, com'è noto, un larghissimo uso.

Se un sistema di forze applicate a un corpo non ne modifica lo stato di quiete o di moto, le forze sono cioè tali che i loro effetti, per usar una frase comune, si *elidono*, diremo che si fanno *equilibrio*, o anche che quel sistema di forze è un *sistema equibrato*. Accetteremo per intuizione vero quanto segue: che due forze sieno eguali per intensità se, applicate allo stesso corpo, nella *stessa direzione e in sensi opposti*, non modificano lo stato del corpo, ossia se in quelle condizioni si fanno equilibrio.

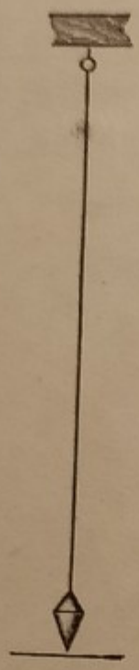


Fig. 19.

Con ciò noi ammettiamo che il più semplice sistema equilibrato è formato di due forze *eguali e opposte*. È anche evidente che due forze le potremo ritenere eguali se fatte successivamente agire nelle stesse condizioni sopra un medesimo corpo producono lo *stesso effetto*; ad esempio, se fatte agire per trazione sopra una molla ad elica (fig. 20) in direzione dell'asse, producono separatamente nella molla lo stesso allungamento. Ed una data forza la riterremo doppia, tripla, ecc., di un'altra, se fatta agire sopra la detta molla produrrà lo stesso allungamento che producono 2, 3 forze tutte eguali all'altra, agenti insieme.

Per la misura delle forze fa comodo perciò scegliere senz'altro una determinata forza come *unità*. E come tale si è convenuto di prendere il *grammo*, o più esattamente *grammo-forza*, cioè la forza con cui la Terra attira 1^{cm^3} di acqua distillata a 4° di temperatura [1]. Tale è l'*unità statica*,

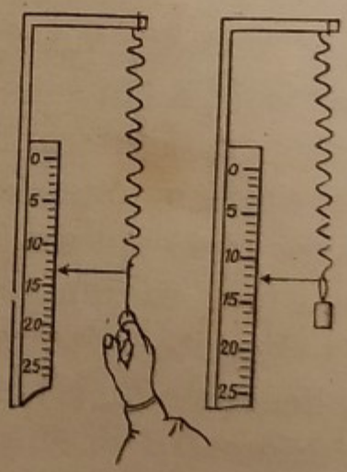


Fig. 20.

(1) In verità il *grammo* è la millesima parte del peso che, alla latitudine di 45° e al livello del mare, ha un blocco di platino iridiato che si conserva nell'Ufficio Internazionale di Pesi e Misure di Sèvres; la differenza fra questa unità e quella sopra definita è praticamente trascurabile.

perchè serve alla misura delle forze fondata sopra il criterio dell'equilibrio; più innanzi si parlerà dell'*unità dinamica*.

Riprendiamo allora la molla di cui si è or ora parlato e fissiamone l'estremità superiore alle sommità di una scatola che porta in alto un anello per sospendere l'apparecchio (fig. 21). L'estremità inferiore della molla è unita ad un uncino, al quale viene applicata la forza che si vuol misurare. Un indice, fissato pure allo estremo inferiore della molla, sporge da una fenditura longitudinale praticata nella scatola e scorre sopra una scala graduata.

Fig. 21.

Le divisioni e i numeri sono segnati sospendendo all'uncino inferiore dei pesi noti, di 1, 2, 3... kg. Va però notato che l'elasticità della molla varia col tempo, cosicchè sospendendo ad essa dopo qualche tempo dalla graduazione la stessa serie di pesi, si ottengono indicazioni diverse dalle primitive, per cui occorre di tanto in tanto eseguire delle correzioni. L'apparecchio descritto vien chiamato *dinamometro*.

Esso talora serve negli usi comuni anche come bilancia.

Stabilito ciò si capisce facilmente che la forza è una grandezza che è possibile rappresentare *graficamente*; a tale scopo serve un segmento terminato a freccia (fig. 22), l'estremità del quale opposta alla freccia, può rappresentare il punto di applicazione della forza; la direzione e il senso della freccia rappresentano la direzione e il senso della forza e la lunghezza del segmento, l'intensità della forza quando si sia stabilita la scala di rappresentazione, vale a dire la lunghezza del segmento che rappresenta la forza *uno*. Una forza così rappresentata la si nominerà o colle due lettere che sono sugli estremi della freccia, mettendo prima quella che sta sul punto di applicazione, o con la sola lettera che sta sulla

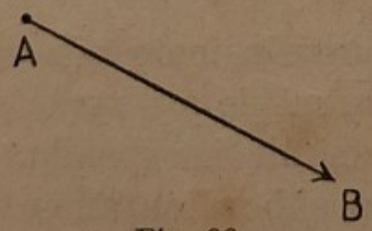


Fig. 22.

freccia. Quindi la forza rappresentata in figura 22 si nominerà: AB, oppure B.

9. Equilibrio di forze nei casi più semplici. — Nel precedente paragrafo è detto che il più semplice sistema di forze in equilibrio è formato di due forze eguali e contrarie AB e AC (fig. 23) applicate allo stesso punto A di un corpo e si fanno anche equilibrio due forze AB e A_1C (fig. 24) eguali e contrarie agenti in due

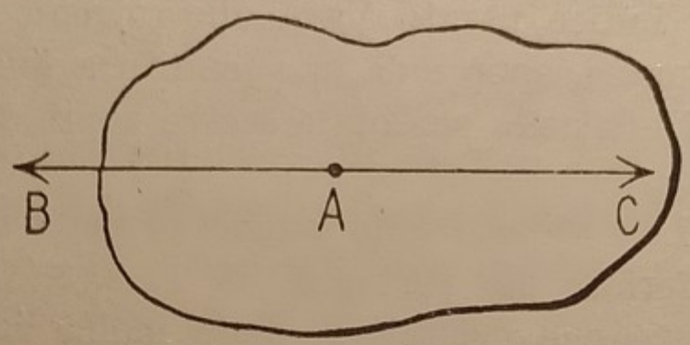


Fig. 23.

punti distinti A e A_1 che sono sulla loro direzione. Ma si possono avere infiniti altri sistemi di forze in equilibrio, dei quali esamineremo i più importanti. Tipico è un sistema di 3 forze complanari applicate a un medesimo punto, realizzabile mediante l'apparecchio schizzato nella figura 25, la quale rappresenta una tavola nera verticale che porta lateralmente verso l'alto due

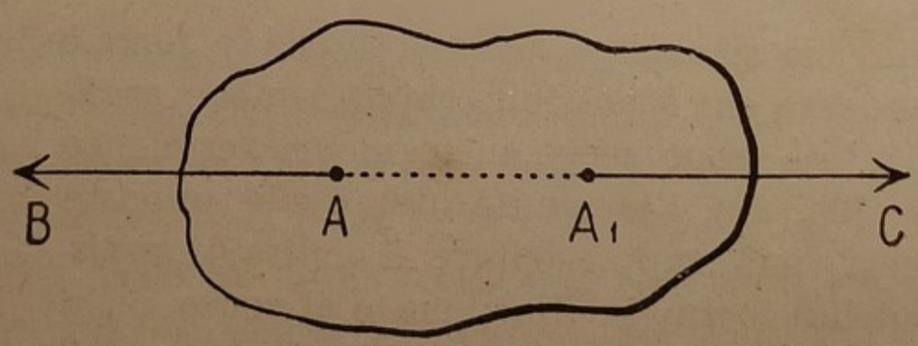


Fig. 24.

carrucole M ed N. Di tre cordoncini annodati insieme per un estremo O due si fanno passare sopra le carrucole e il terzo si lascia pendere liberamente. Alle estremità dei fili si sospendono tre pesi P, Q, T, che possono essere qualunque subordinatamente alla condizione, che uno qualsiasi sia minore della somma degli altri due e maggiore della loro differenza. In tal modo i cordoncini prendono da per sè delle direzioni convenienti e ne risulta

un sistema di tre forze in equilibrio, applicate allo stesso punto O e giacenti nello stesso piano, che nel caso attuale è verticale. Una delle tre forze, per es. la T, può considerarsi come la equilibrante delle forze P e Q. Or si segnino sulla tavola i segmenti OA e OB che rappresentano le forze P e Q, si costruisca il parallelogrammo che ha per lati OA e OB e si tracci

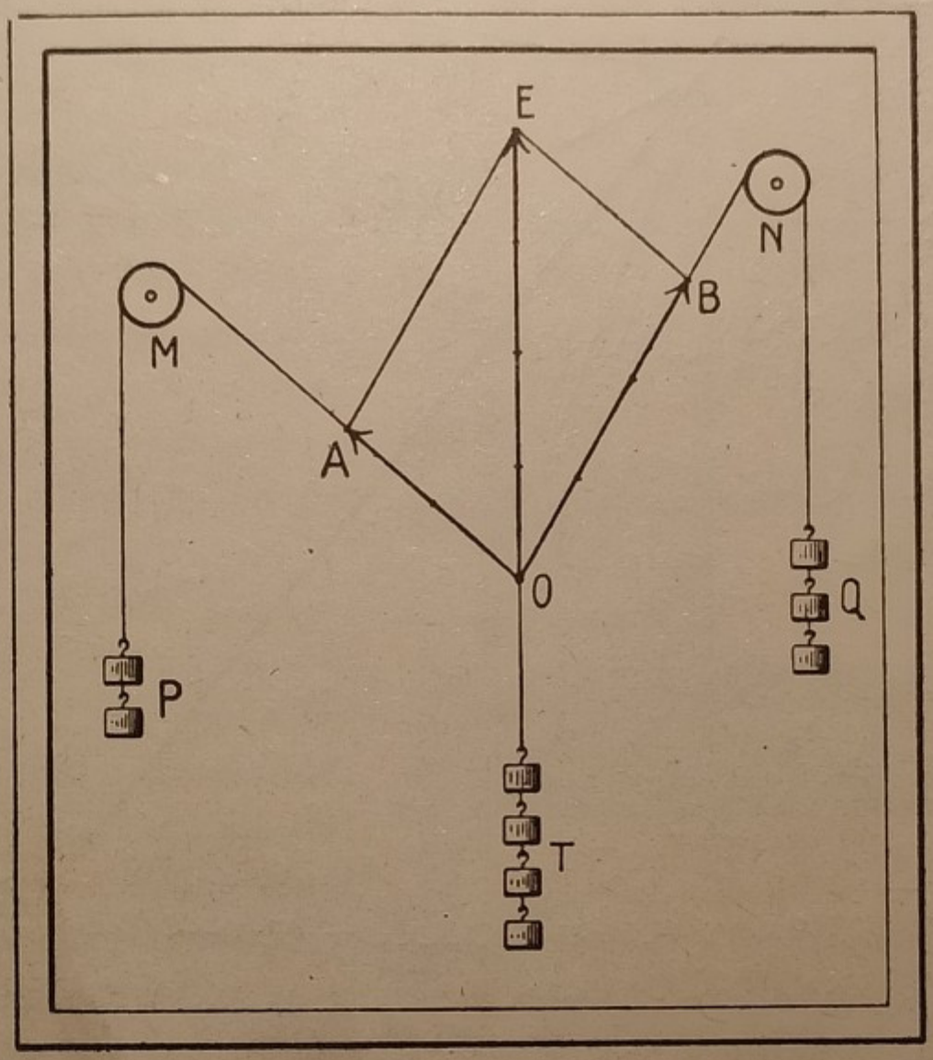


Fig. 25.

la diagonale OE; si riscontra che questa diagonale è eguale ed opposta al segmento che rappresenterebbe la forza T. La forza rappresentata da OE, che equivale, agli effetti dell'equilibrio, alle forze P e Q, si dice *risultante* delle forze P e Q, rappresentate da OA e OB, dette *componenti*. Quindi: *la risultante di due forze ad angolo applicate allo stesso punto è una forza giacente nel piano delle componenti, applicata nello stesso punto e rappresentata dalla diagonale del parallelogrammo che ha per lati i segmenti rappresentanti le componenti stesse.*

Più brevemente si dice anche che *la risultante anzidetta è la diagonale del parallelogrammo costruito sulle componenti.* È questa la nota *regola del parallelogrammo delle forze.* Si tenga poi ben presente che risultante ed equilibrante di un dato sistema di forze sono forze eguali ed opposte.

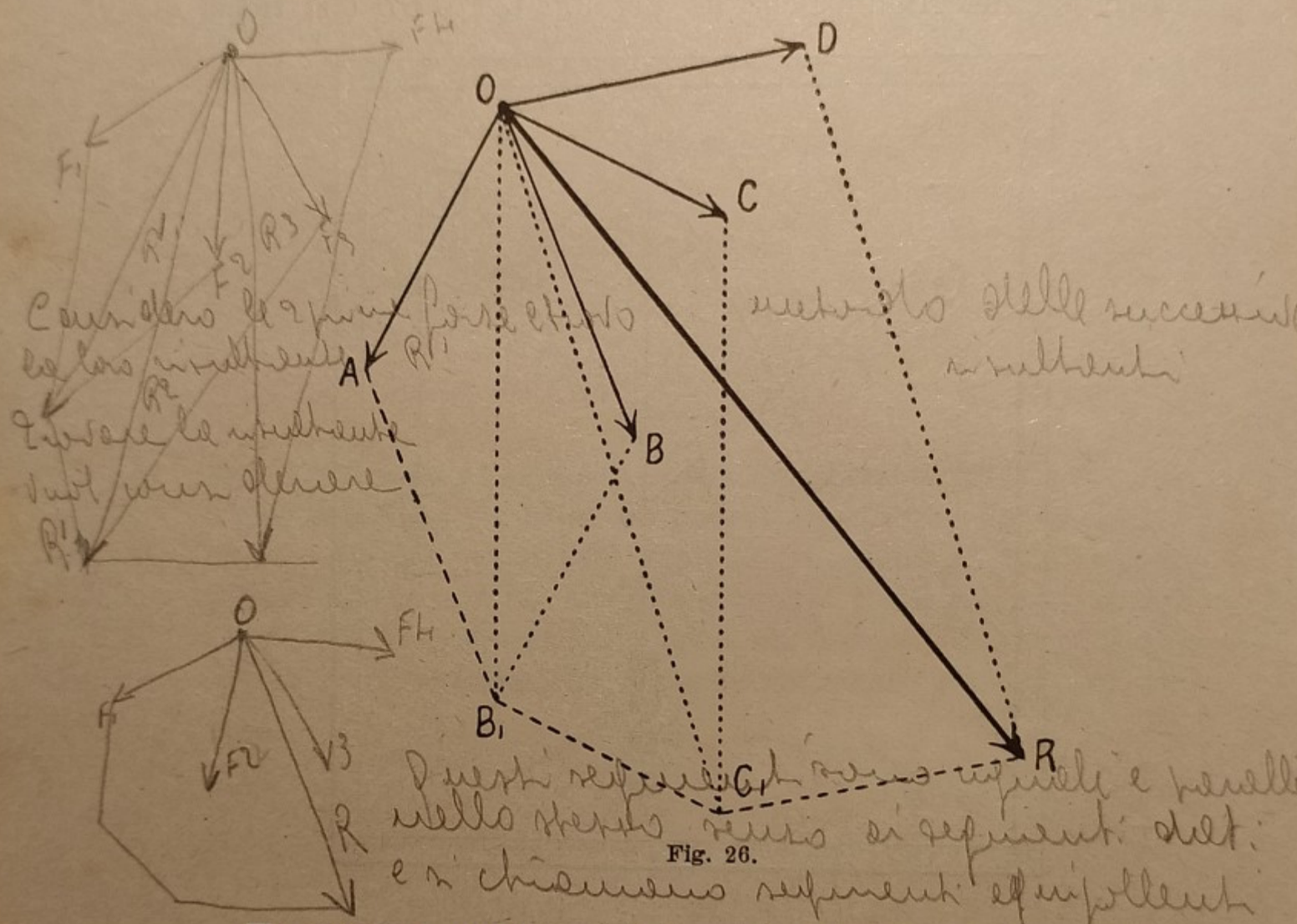


Fig. 26.

Un sistema complanare di forze in equilibrio può essere formato anche da un numero di forze superiore a tre.

Si consideri il sistema delle forze complanari A, B, C, D applicate nello stesso punto O (fig. 26). Colla regola del parallelogrammo si tracci la OB_1 risultante delle A e B; poi la OC_1 risultante delle B_1 e C; in ultimo la OR risultante delle C_1 e D, cioè la risultante del sistema dato. La forza eguale e contraria alla R è la equilibrante del sistema.

La figura precedente si adatta anche al caso di un sistema di più forze comunque concorrenti in un punto, anche non complanari.

10. Forze parallele. — Realizziamo ora un sistema equilibrato di tre forze parallele. Può servire l'apparecchio della figura 27, formato di un'asta AB sostenuta da due funicelle, che passano su due puleggie, agli estremi delle quali sono attaccati dei pesi $P = 2$ e $Q = 1$. Per tentativi si trova che il sistema viene equilibrato in una unica maniera con un peso $R = 3$ attaccato in un punto C dell'asta, tale che sia:

$$CA : CB = Q : P.$$

Se si considera R come equilibrante delle P e Q la risultante di queste è una forza eguale e contraria alla R, quindi: *la risultante di due forze parallele P e Q cospiranti, cioè dirette nello stesso verso, è complanare e parallela a queste ed ha lo stesso senso, ha un'intensità eguale alla somma delle intensità delle componenti e il suo punto di applicazione divide la congiungente i punti di applicazione delle componenti in parti inversamente proporzionali alle intensità di queste.*

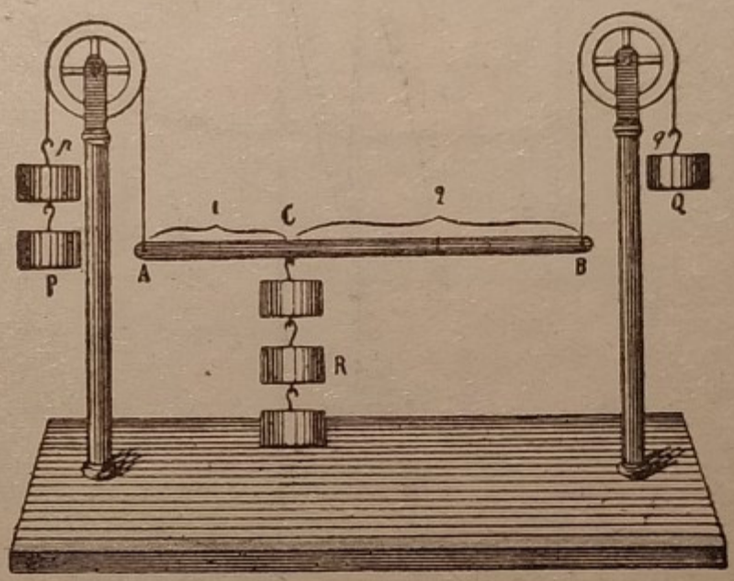


Fig. 27.

Se, diversamente, si considera come equilibrante nel sistema in discussione una delle forze P o Q, per esempio la P, la risultante delle R e Q è la forza eguale e contraria a P; da ciò la regola: *la risultante di due forze parallele contrarie è complanare e parallela alle componenti, ha il senso della componente maggiore, intensità eguale alla differenza delle componenti, col punto di applicazione sul prolungamento della congiungente i punti di applicazione delle componenti dalla parte della maggiore, a distanze dai punti di applicazione delle componenti inversamente proporzionali alle stesse.* Quest'ultima relazione si deduce dalla (1), dalla quale, applicando il componendo, si ottiene:

$$CA : CA + CB = Q : Q + P;$$

ma essendo: $Q + P = R$ e $CA + CB = AB$, si ha:

$$CA : AB = Q : R.$$

Nei casi contemplati abbiamo trovata la risultante di più forze, abbiamo cioè, come si dice, eseguita la *composizione delle forze.*

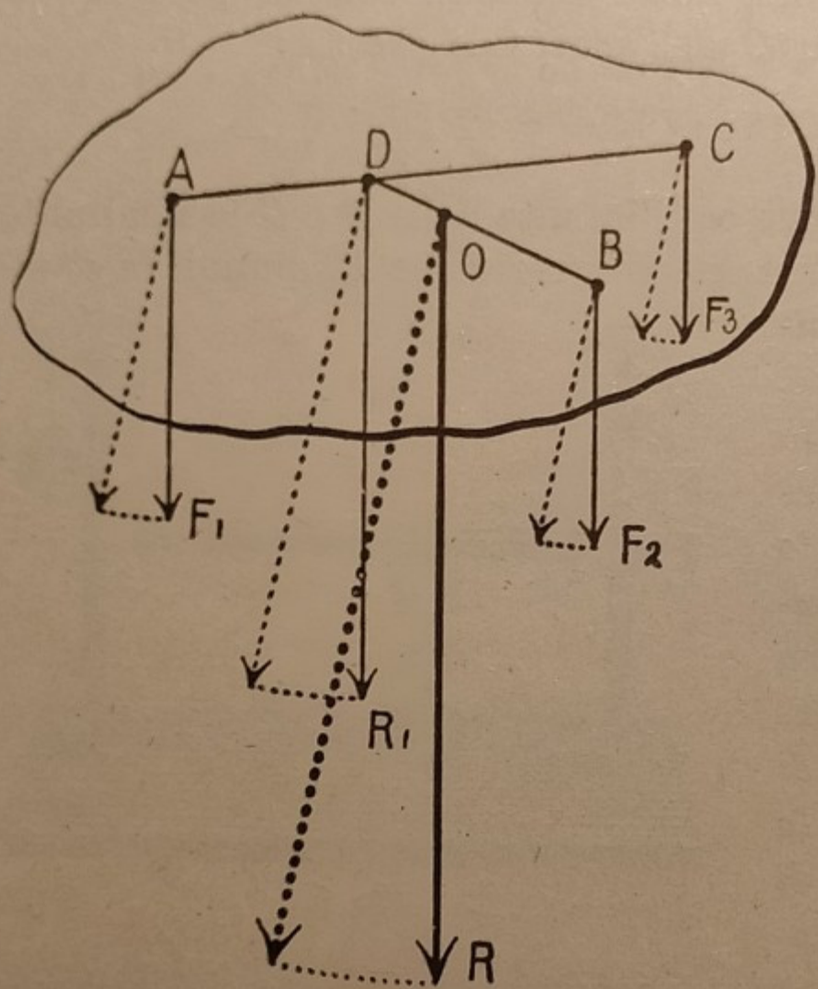


Fig. 28.

Non maggiore difficoltà offre la composizione di un numero qualunque di forze parallele.

Sieno F_1, F_2, F_3 più forze componenti parallele e dirette nello stesso senso.

La risultante delle F_1 e F_3 sia R_1; questa, composta con la F_2, dà la risultante cercata R (fig. 28).

La risultante generale è eguale alla somma delle forze date. Il suo punto di applicazione O chiamasi *centro delle forze parallele.*

E poichè il punto D di applicazione della risultante di due forze parallele soddisfa alla nota relazione:

$$\frac{AD}{DC} = \frac{F_3}{F_1},$$

la posizione di questo punto non dipende nè dalla direzione delle componenti, nè dal loro valore assoluto, purchè il rapporto delle loro intensità resti invariato.

I punti di applicazione delle risultanti successive e anche della risultante generale godono della stessa proprietà. *La posizione del centro delle forze parallele resta dunque invariata*

quando si faccia variare la comune direzione delle componenti F_1 F_2... e anche quando si alterino tutte le forze in uno stesso rapporto.

11. Decomposizione di una forza in due complanari. — Si può sempre sostituire ad una forza data, due o più forze agenti nello stesso punto. Ma mentre due forze date applicate a un punto ammettono solo una risultante, *la decomposizione di una forza in due è possibile in un numero infinito di modi.* Basta infatti che le due componenti, graficamente rappresentate, formino un *triangolo* colla forza data. Ciascuna delle com-

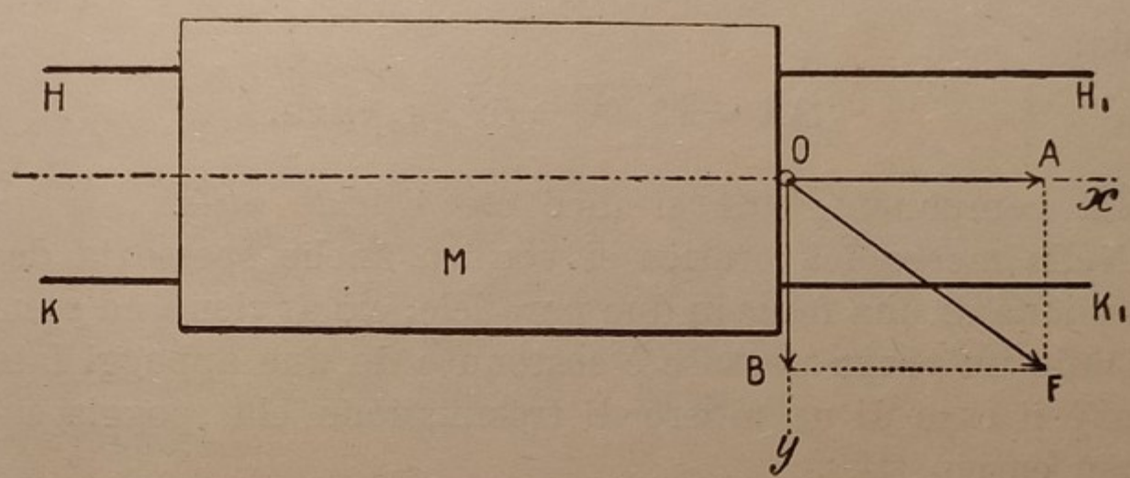


Fig. 29.

ponenti ottenute può alla sua volta essere ulteriormente decomposta.

La decomposizione di una forza in due agenti nello stesso punto, ha una particolare importanza in certi casi, in cui l'effetto della forza non può manifestarsi che in una determinata direzione.

Nelle stazioni si usa spesso far trainare un vagone da un cavallo che cammina fuori del binario. Nella figura 29 M rappresenta il vagone, HH_1 KK_1 le rotaie, OF la forza esercitata dal cavallo. Questa forza si decompone in due: l'una OA diretta secondo l'asse Ox del binario, l'altra OB nella direzione Oy perpendicolare allo stesso. Quest'ultima non ha alcun effetto per il moto del corpo; essa non fa che premere le ruote del vagone contro la rotaia che sta dalla parte del cavallo, ed è una forza che viene equilibrata dalla contropressione esercitata sulle ruote dalla stessa rotaia.

L'effetto di tale forza a lungo andare si manifesterebbe per il consumo della rotaia e delle ruote che vi premono contro. Ma per il moto del vagone ha solo effetto la componente OA, che evidentemente ha un valore minore di OF, e tanto minore quanto maggiore è l'angolo AOF; di guisa che il massimo effetto lo si otterrebbe rendendo $AOF = 0$, cioè facendo camminare il cavallo fra le due rotaie e obbligandolo a tirare secondo Ox.

Supponendo $AOF = 30°$ e $OF = 60$ kg. si avrebbe $OB = 30$ kg., e quindi:

$$OA = \sqrt{60^2 - 30^2}$$

ossia:

$$OA = \sqrt{2700} = 52 \text{ kg. circa.}$$

La componente OA si dice *componente utile.*

Nella meccanica pratica si verifica anche spesso la decomposizione di una forza in due parallele; ciò avviene, ad esempio, quando un corpo pesante è sostenuto da due appoggi laterali, com'è il caso di un albero di trasmissione che poggia su due o più cuscinetti.

12. Equilibrio di corpi aventi un punto o un asse fisso. — Cominciamo da quest'ultimo caso, che assorbe il primo. Un

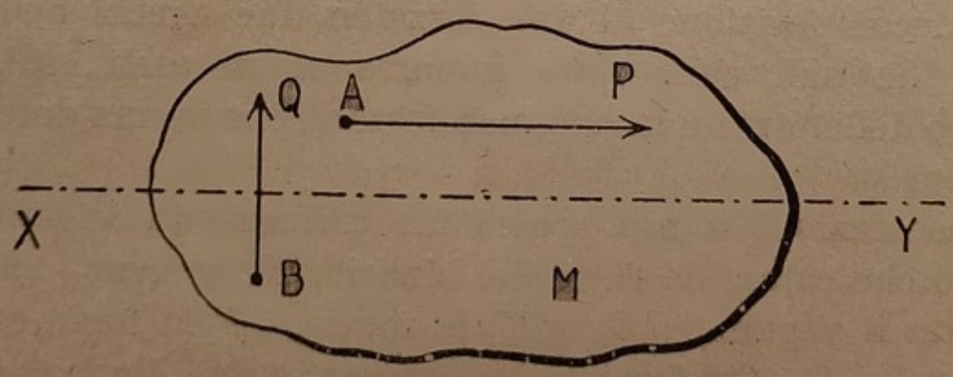


Fig. 30.

corpo ha un asse fisso quando può solo assumere un movimento rotatorio intorno a un asse; tale è il caso di una porta comune, di una puleggia di trasmissione, ecc. Rappresentiamo il corpo girevole con M (fig. 30) e vediamo quali forze agenti *non* pro-

ducono il movimento del corpo. Una forza come la AP agente parallelamente all'asse, in un punto qualunque A, non ha alcun effetto, poichè essa tende solo a spostare il corpo lungo l'asse, ciò che per ipotesi non è possibile. Analogamente è senza effetto anche la forza BQ che incontra perpendicolarmente l'asse e che tende solo a spostare il corpo trasversalmente.

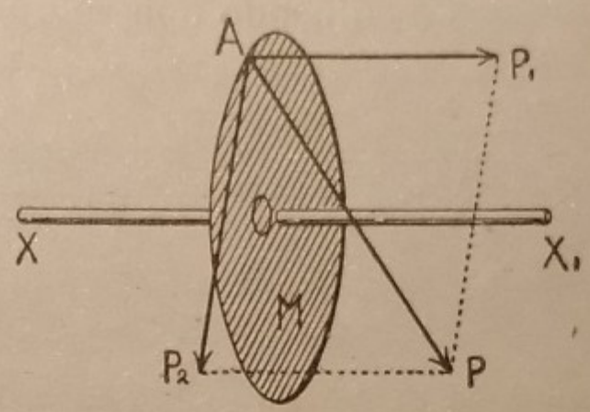


Fig. 31.

Per conseguenza è senza effetto qualunque forza che giace in uno stesso piano coll'asse: infatti tal forza può decomporsi in due, agenti nello stesso punto e nel piano individuato dalla forza data e dall'asse, l'una parallela all'asse, l'altra tagliante l'asse perpendicolarmente. Tali componenti per le considerazioni fatte sono inefficaci per il moto del corpo.

Cosicchè, riassumendo, *sopra un corpo girevole intorno ad un asse non produce effetto qualunque forza che giace coll'asse in uno stesso piano.*

Vediamo ora il comportamento di una forza che non si trovi in tal condizione. Per semplicità di rappresentazione si abbia una ruota o un disco M (fig. 31) girevole intorno al proprio asse XX_1 soggetto a una forza AP che *non incontri* l'asse; la figura è prospettica. Decomponiamo tal forza nelle due AP_1 AP_2, la prima parallela all'asse, l'altra posta sul piano del disco, cioè in un piano perpendicolare all'asse. Quest'ultima non passa per O, poichè, per ipotesi, la forza data AP non è in uno stesso piano coll'asse. La prima non ha, per quanto sopra si disse, alcun effetto; per cui, se c'è rotazione, questa compete solo alla componente AP_2. Rappresentiamo il disco in parola sul piano del foglio (fig. 32); allora il suo centro O rappresenta la traccia dell'asse, che va inteso perpendicolare al piano del

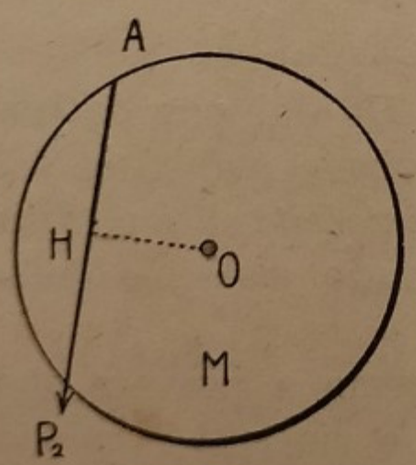


Fig. 32.

foglio nel punto O. Si comprende che la componente AP_2 produce una rotazione nel senso contrario delle lancette di un orologio.

Vogliamo ora dimostrare che l'effetto di rotazione della forza AP_2 dipende non soltanto dalla sua intensità, ma anche

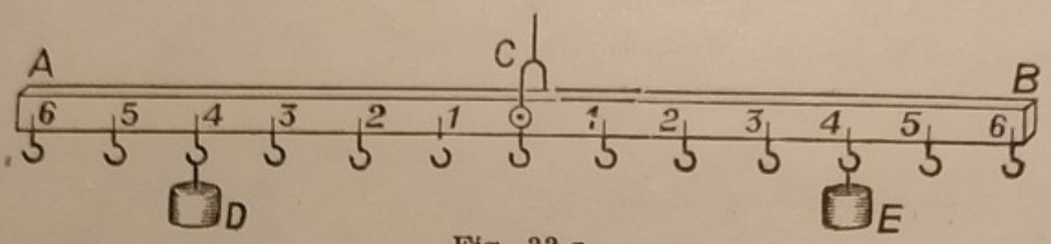


Fig. 33 *a*.

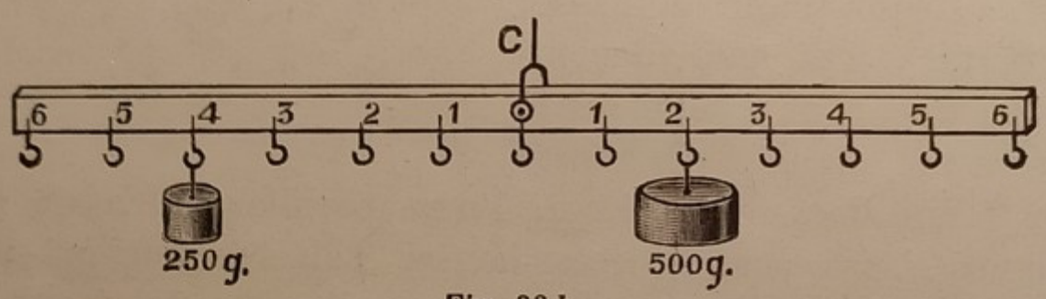


Fig. 33 *b*.

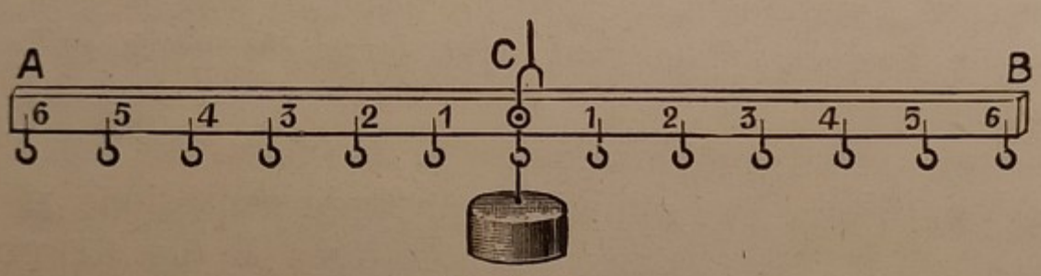


Fig. 33 *c*.

dal suo *braccio*, cioè dalla sua distanza OH dal punto O, e precisamente che il suo effetto di rotazione può ritenersi misurato dal *prodotto* $AP_2 \times OH$ *della intensità della forza per il suo braccio*. Tale prodotto è chiamato *momento* della forza rispetto all'asse.

Ciò noi riterremo dimostrato se riusciremo a provare che due forze agenti sopra un corpo girevole e giacenti in piano perpendicolare all'asse di rotazione, si fanno equilibrio se hanno rispetto all'asse momenti eguali e di segno *contrario*, cioè se tendono a produrre rotazioni opposte.

La verifica si ottiene con l'apparecchio della figura 33; un regolo AB ha nel suo punto di mezzo un pernio ad esso perpendicolare che si può infilare nella staffa C. Il regolo è diviso in

parti eguali ed a ciascun punto di divisione si trova un gancio per attaccarvi dei pesi. Alla distanza di 4 divisioni dall'asse sospendiamo un peso D, e un peso eguale E a 4 divisioni dalla parte opposta; riscontreremo che si verifica l'equilibrio (fig. 33 *a*). Sospendiamo in un secondo tempo un peso di 250 grammi alla divisione 4ª di sinistra; l'equilibrio si ottiene sospendendo un peso di 500 grammi alla divisione 2ª di destra (fig. 33 *b*). Vediamo cioè che ha luogo l'equilibrio con due pesi attaccati dalle parti opposte dell'asse, quando sia costante il prodotto di ciascun peso per la sua distanza dall'asse medesimo, cioè quando i due pesi hanno rispetto all'asse momenti eguali e di segno contrario. Si ha equilibrio anche nel caso della fig. 33 *c*, nella quale un peso è attaccato al gancio che corrisponde all'asse; perchè in questo caso il suo momento è zero, essendo zero il braccio d'azione. Nell'apparecchio descritto si può avere l'equilibrio anche con un numero qualunque di forze. Occorre in questo caso fare le somme separate dei momenti positivi e di quelli negativi; se tali somme sono eguali si ha l'equilibrio. Con altre parole si può dire che *l'equilibrio ha luogo quando la somma algebrica dei momenti delle forze rispetto all'asse di rotazione è eguale a zero.*

Se il corpo in questione ha un punto fisso, lo si può ritenere mobile intorno a qualunque asse che passa per quel punto, quindi l'equilibrio si verifica ancora se è nulla la somma algebrica dei momenti delle forze rispetto al punto fisso. I bracci delle forze sono in questo caso le distanze del punto fisso dalle loro direzioni.

13. Coppia. — *È un sistema di due forze AP, BQ* (fig. 34) *parallele, dirette in senso contrario e di eguale intensità.* Il sistema non ammette alcuna equilibrante, e non ha quindi nemmeno risultante, cioè non esiste una forza che può sostituire una coppia. Questa non imprime, come una forza, un moto traslatorio al corpo, ma lo fa ruotare attorno ad un asse perpendicolare al piano delle sue forze, fino a che la linea AB dei punti di applicazione abbia preso la direzione delle

forze; allora le due forze, risultando opposte, si fanno equilibrio.

Una coppia è caratterizzata dal suo *piano*, il piano delle sue forze; dal *senso della rotazione* e dal suo *momento*. Il momento d'una coppia è il *prodotto della intensità delle forze per il braccio*, che è *la distanza AH delle due forze*. Il momento

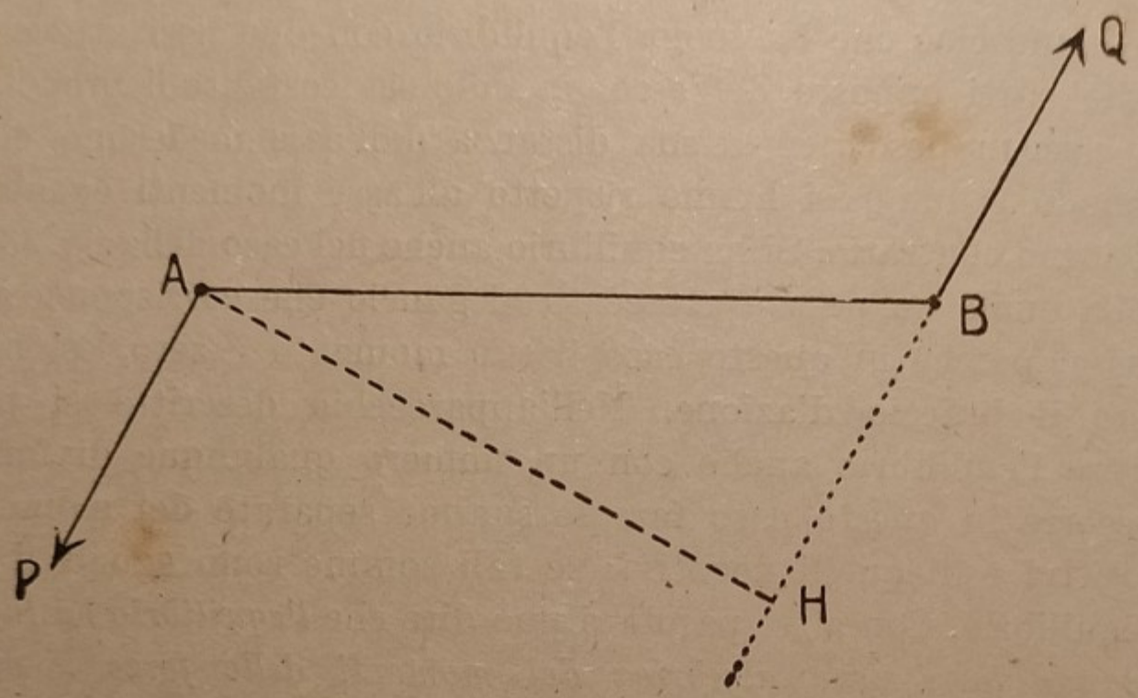


Fig. 34.

d'una coppia misura il *valore* della coppia, ossia l'importanza che essa ha per produrre la rotazione; infatti si dimostra che una coppia può essere sostituita da un'altra, situata nello stesso piano o in un piano parallelo, dello stesso senso di rotazione e dello stesso momento. Da ciò anche risulta che due coppie, situate nello stesso piano o in piani paralleli, si fanno equilibrio se hanno momenti eguali e se le loro rotazioni hanno sensi contrari.

Nelle applicazioni industriali si trovano frequentemente delle coppie in azione; i motori rotativi, le turbine ad acqua e a vapore, i motori elettrici sono azionati da coppie. Nel corso del nostro studio incontreremo anche delle coppie in azione; un caso tipico e molto istruttivo è quello dell'ago magnetico della bussola comune, di cui verrà detto nella Magnetostatica.

14. Gravità; baricentro. — La *gravità* è la forza che determina la caduta dei corpi. Ogni corpo ha un *peso*, che è la forza di gravità particolare di cui è soggetto. Al § 8 si è accennato alla forza di gravità e ne abbiamo determinata mediante il piombino la direzione, che è *verticale*, cioè perpendicolare alla superficie delle acque stagnanti.

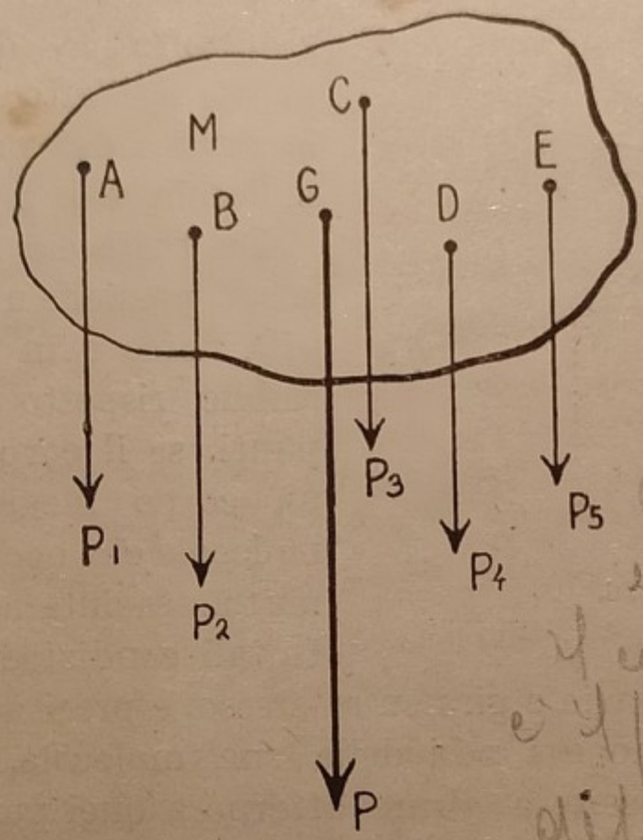


Fig. 35.

In un corpo M (fig. 35) sono pesanti le singole molecole, ciascuna delle quali è soggetta a una forza verticale AP_1, BP_2, CP_3,... Queste forze concorrono veramente nel centro della Terra, ma il raggio di questa è così grande rispetto alle dimensioni dei corpi, sui quali noi operiamo, da poter ritenere che si incontrino a distanza infinita (1). Due fili a piombo attaccati alla

(1) L'angolo di due verticali condotte per due punti della superficie terrestre distanti 1 km. è circa mezzo primo, precisamente $\frac{360 \times 60}{40000} = \frac{27}{50}$ di primo, ossia 0°. 0′. 32″, 4; ciò deriva ricordando che la circonferenza massima terrestre è di circa 40.000 km.

cupola di S. Pietro, alta circa 130^m, alla distanza di 1^m, in vicinanza del pavimento sarebbero più vicini di poco più di due centesimi di millimetro. Senza errore sensibile possiamo dunque riguardare come forze parallele i pesi P_1, P_2, P_3... delle molecole di un corpo, il loro centro G (10) ne è il *centro di gravità* o *baricentro*, e la loro risultante P, diretta verticalmente dall'alto in basso, che è la somma dei pesi delle singole molecole, è il *peso del corpo*.

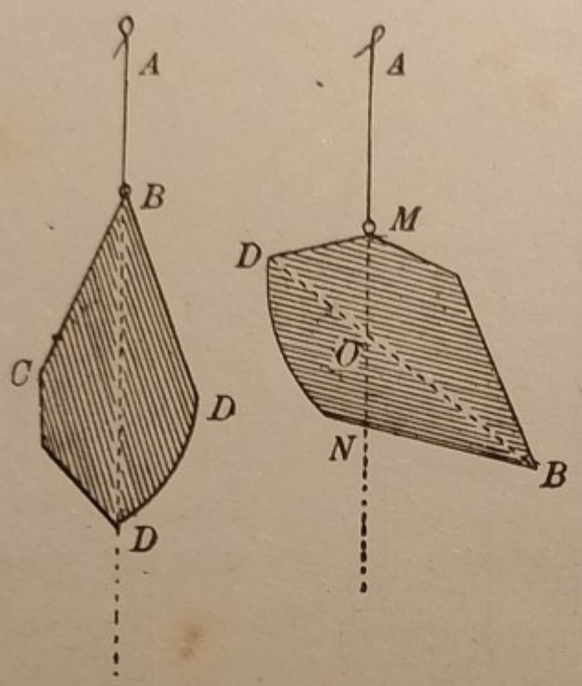


Fig. 36.

Da tutto ciò risulta che ogni corpo possiede un centro di gravità unico e in posizione invariabile rispetto agli altri suoi punti, se il corpo è rigido, cioè un corpo ideale composto di molecole che occupano posizioni mutue assolutamente invariabili. In tali condizioni, se il corpo si sposta nello spazio o gira su se stesso, è precisamente come se rimanesse fermo e i pesi delle sue molecole, mantenendosi paralleli, venissero a girare attorno a quei punti.

Cosicchè, nel trattare dell'equilibrio di un corpo pesante, si potrà considerare il corpo come soggetto a un'unica forza, *il suo peso, applicata nel centro di gravità, ed agente in direzione verticale dall'alto in basso.*

Se un corpo (fig. 36) sospeso a un filo A per un punto B rimane in quiete, vuol dire che il prolungamento del filo passa per il suo centro di gravità; se poi sospendiamo lo stesso corpo per un altro punto M, il centro di gravità dovrà sempre trovarsi sul prolungamento del filo medesimo; quindi abbiamo un metodo sperimentale per determinare il centro di gravità di un corpo qualunque, rintracciando il punto O d'incontro dei due prolungamenti BD e MN.

Tale metodo, che comunemente si dice metodo *sperimentale* per la ricerca del centro di gravità, si può applicare solo a quei corpi cavi, lamellari e simili, nei quali si possa segnare, sì

che ne resti traccia, il prolungamento del filo di sospensione; perciò ha maggiore importanza, anche per le applicazioni, il metodo *razionale*, sebbene questo valga limitatamente per i corpi omogenei e che hanno certe forme geometriche. A proposito, ci limitiamo a riferire i principali risultati:

a) due elementi pesanti uguali, riuniti da un legame rigido senza peso, hanno il centro di gravità alla metà della loro distanza;

b) un segmento pesante ha il centro di gravità nel suo punto di mezzo;

c) un triangolo ha il centro di gravità nel punto di incontro delle tre mediane;

d) il cerchio e la sfera nel centro geometrico;

e) la piramide e il cono hanno il centro di gravità sulla congiungente il vertice col centro di gravità della base, a tre quarti della detta congiungente a partire dal vertice;

f) il prisma e il cilindro a basi parallele, nel punto di mezzo della congiungente i centri di gravità delle basi.

15. Equilibrio dei gravi. — Per lo studio dell'equilibrio di un corpo pesante *girevole intorno ad un asse*, sono applicabili i principî generali stabiliti al § 12, tenendo presente che l'azione della gravità si riduce a quello d'una forza eguale al peso del corpo e agente nel suo centro di gravità in direzione verticale.

L'equilibrio quindi ha luogo quando la direzione della forza agente — il peso del corpo — e l'asse di rotazione sieno complanari.

Or se l'asse è verticale, questa condizione è soddisfatta per qualunque posizione del corpo. È il caso che si verifica nelle imposte delle porte e delle finestre (fig. 37). In tali corpi il centro di gravità G coincide approssimativamente col centro di figura; e l'equilibrio è sempre indifferente perchè la complanarità dell'asse di rotazione XY e del peso P è soddisfatta per qualunque posizione del corpo.

Se l'asse non è verticale, la condizione di equilibrio, cioè della complanarità dell'asse e del centro di gravità, è verificata in tre modi diversi secondo che il centro di gravità è *sotto*, *sopra* o *coincide* coll'asse, e si hanno corrispondentemente le tre forme di equilibrio *stabile* (fig. 38), *instabile* (fig. 39) e *indifferente* (fig. 40).

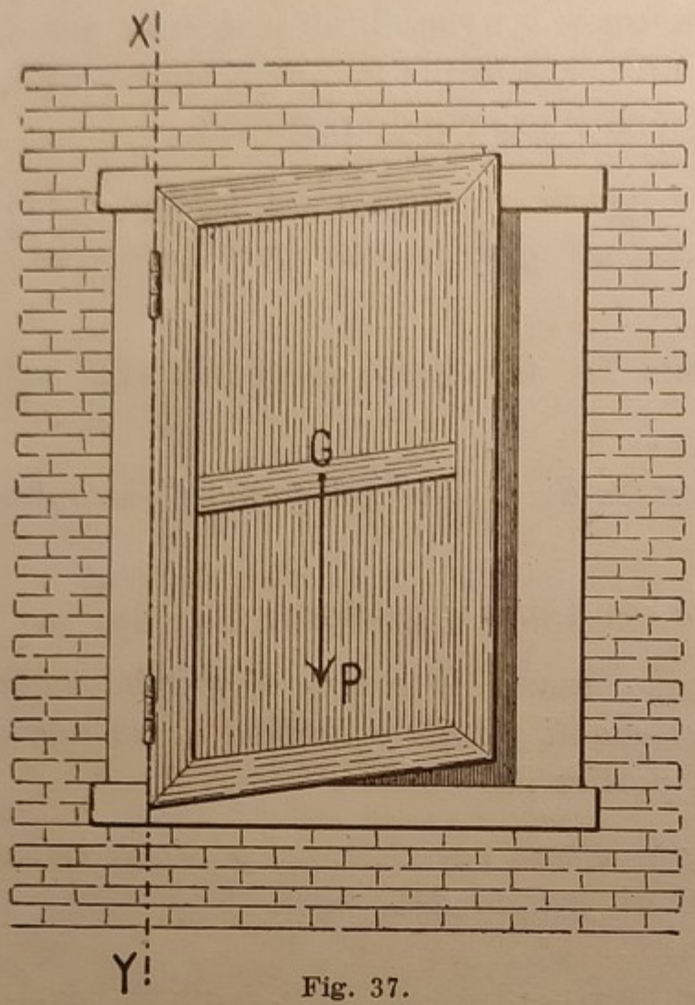


Fig. 37.

Se il corpo pesante ha un *punto fisso*, si può ammettere che esso possa girare intorno ad un asse qualunque passante per quel punto; perciò l'equilibrio ha luogo alla condizione che tal punto si trovi sulla direzione della forza agente sul corpo; in altre parole, alla condizione che il punto fisso e il centro di gravità si trovino sulla

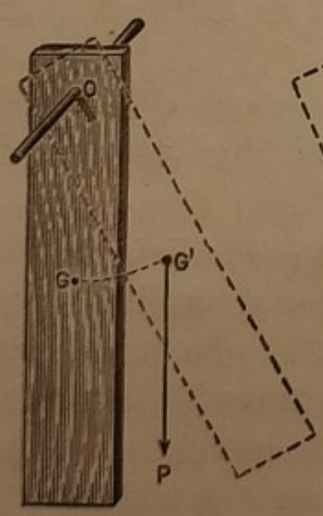


Fig. 38.

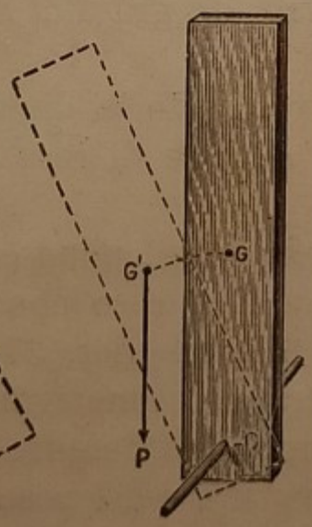


Fig. 39.

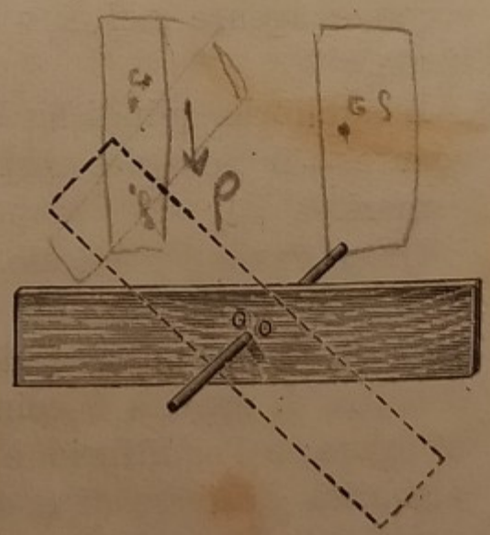


Fig. 40.

Per l'equilibrio occorre che questo punto non possa girare nel corpo cioè non sia sul punto di sospensione

stessa verticale. E anche in questo caso si possono verificare le tre condizioni precedenti secondo che il centro di gravità è sotto (fig. 41), sopra (fig. 42), o coincide col punto fisso (fig. 43). Nella figura 41 è rappresentato un cono di ferro attaccato per il vertice ad un polo di una calamita; la 42 mostra un cono poggiante col vertice sopra un piano fisso; nella 43 si ha un anello sòspeso a un filo fissato a metà d'una sbarretta diametrale.

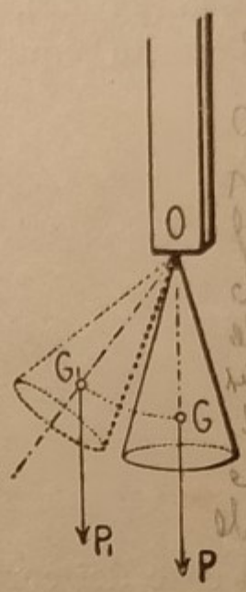


Fig. 41.

E qui crediamo conveniente di spiegare ciò che significano le espressioni equilibrio stabile, instabile, indifferente.

Si dice che un corpo è in equilibrio stabile o instabile quando leggermente spostato dalla sua posizione di equilibrio, tende a ritornarvi sotto l'azione delle forze che lo sollecitano o ad allontanarsene sempre più. E si dice che un corpo è in equilibrio indifferente se spostato dalla posizione in cui si trova a un dato istante, rimane in quiete nella nuova posizione.

È utile notare che nei casi illustrati precedentemente, l'equilibrio è stabile se il centro di gravità occupa la posizione infima consentita dai legami a

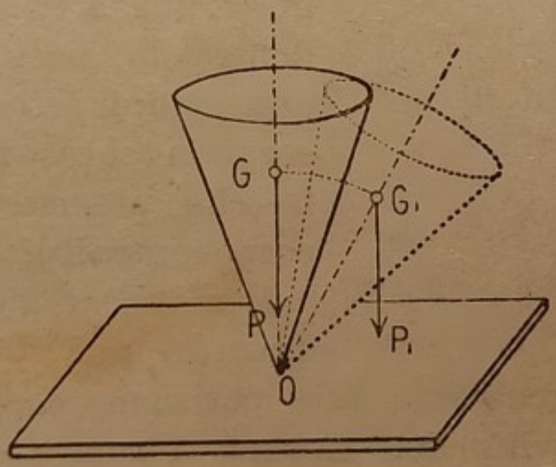


Fig. 42.

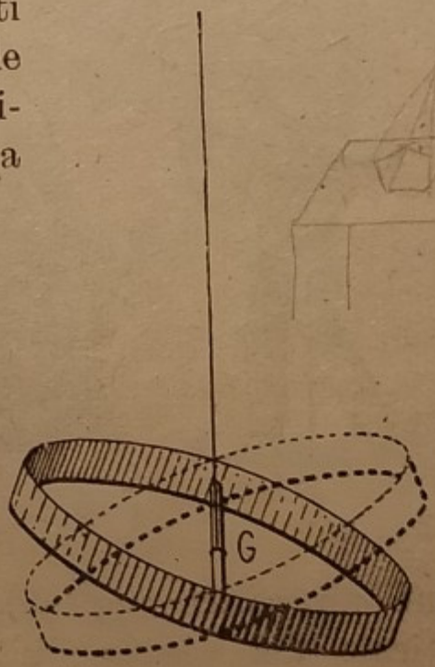


Fig. 43.

cui il corpo è soggetto; instabile se la posizione del centro di gravità è la più alta possibile, indifferente se il centro di gravità non può nè sollevarsi nè abbassarsi. Un cono e un cilindro pog-

gianti con una generatrice sopra un piano e una sfera poggiata pure sopra un piano, sono corpi girevoli intorno ad un asse (fig. 44), che comprende il loro centro di gravità, e perciò sono in equilibrio indifferente. Resta ancora a considerare

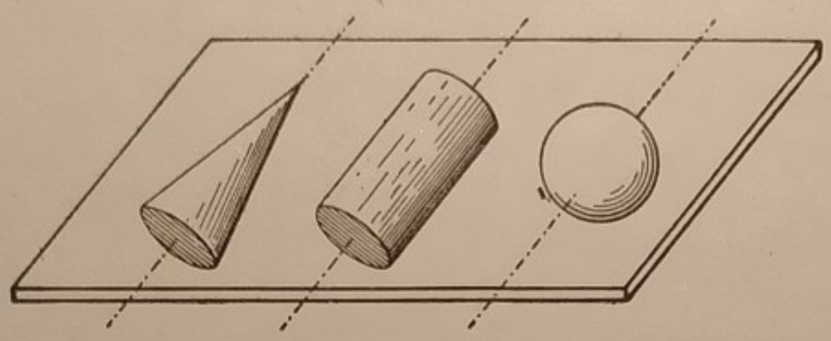


Fig. 44.

il caso dei corpi pesanti che poggiano con più di due punti, non situati in linea retta, sopra un piano orizzontale.

In tal caso chiamiamo *base di appoggio* il massimo poligono convesso che si può costruire coi punti che il corpo ha in comune col piano di appoggio.

Fig. 45.

La condizione di equilibrio è che la verticale del centro di gravità passi dentro la base di appoggio; il peso del corpo in tal caso non fa che premere il corpo contro il piano.

Per tal ragione quando noi portiamo un carico (fig. 45), prendiamo tale posizione che la verticale del centro di gravità del sistema formato dal nostro corpo e dal carico cada dentro la base di appoggio formata dai punti di contatto dei piedi col suolo. Per la stessa ragione occorre prendere certe precauzioni nel caricare un carro, quando questo deve percorrere una strada che pende da un lato (fig. 46). Perchè il carro non ribalti la

verticale condotta dal centro di gravità deve incontrare la strada fra le ruote. In questo caso veramente il piano d'appoggio non è orizzontale, e la condizione precedente non sarebbe sufficiente se gli attriti contro la strada non impedissero lo scivolamento del carro verso il lato più basso della strada stessa.

Corpi pesanti in equilibrio stabile, poggianti su piano orizzontale, sono anche le Torri pendenti di Pisa e di Bologna, nelle quali costruzioni è largamente soddisfatta la condizione sopra enunciata.

Fig. 46.

L'uomo ritto su due piedi sta bene in equilibrio; ma poggiato sopra un sol piede, l'equilibrio diventa un po' più difficile, e più difficile ancora diventa se tenta di camminare sopra uno stretto travicello o sopra una fune, nei quali casi la base d'appoggio risulta assai stretta.

L'uomo però ritto su due piedi è tra gli animali quello che ha una minore stabilità, per avere una base d'appoggio piuttosto stretta in relazione all'altezza del suo centro di gravità; e ciò spiega perchè i bambini trovano grande difficoltà per reggersi in piedi e camminare.

Riassumendo, tutte le condizioni di equilibrio studiate si possono riunire in una sola. Sotto l'azione del peso, che tira il corpo verso il basso, il centro di gravità tende sempre a discendere, sicchè l'equilibrio è tanto più stabile quanto più basso è il centro di gravità.

16. Equilibrio statico di meccanismi semplici: leva, puleggia, asse nella ruota. — L'*equilibrio statico* di un corpo o di una macchina qualsiasi si verifica quando il corpo o la macchina, sotto l'azione di più forze, sono in quiete, a differenza dell'*equi-*

librio dinamico che è uno stato particolare di una macchina in movimento, come si vedrà più innanzi.

In molti casi pratici occorre o di fare equilibrio a qualche forza detta *resistenza*, o di spostarne il punto di applicazione, di *vincerla*, come si dice, per un certo tratto, valendosi di una altra forza detta *potenza*, la quale può avere intensità diversa dalla resistenza o può non essere opposta a questa. A tale scopo servono le *macchine*, che sono, per così dire, apparecchi intermediari fra le due forze.

L'equilibrio in una macchina semplice si può ridurre sempre al caso di due sole forze agenti: la potenza che si adopera per ottenere l'effetto desiderato, e la resistenza che si oppone alla prima. Le macchine semplici sono la *leva*, la *puleggia*, l'*asse nella ruota*, il *piano inclinato*, il *cuneo* e la *vite*.

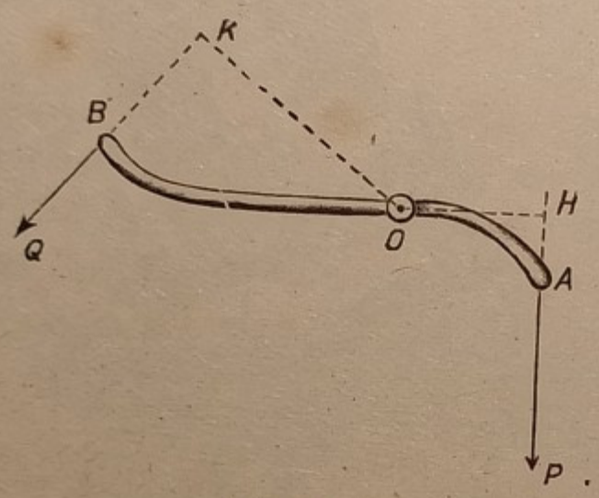


Fig. 47.

1) *La leva* è una spranga rigida e senza peso, girevole intorno ad un asse O detto *fulcro* (fig. 47). La potenza P e la resistenza Q si ammette che giacciano in piano perpendicolare all'asse O, per cui segnati i rispettivi bracci OH e OK, l'equilibrio ha luogo (12) quando i momenti di tali forze rispetto al fulcro O, *sieno eguali e disegno contrario*. Si deve avere cioè:

$$P \times OH = - Q \times OK ;$$

ossia, tenendo conto dei valori assoluti:

$$P : Q = OK : OH .$$

La leva poi, in relazione alle applicazioni che riceve, si divide in leva di *primo genere* se il fulcro è compreso fra la potenza e la resistenza (fig. 48), di *secondo genere* se la resistenza

è applicata fra il fulcro e la potenza (fig. 49); di *terzo genere* se la potenza è compresa fra il fulcro e la resistenza. Ma in tutti i casi l'equilibrio è verificato quando è soddisfatta la condizione espressa nell'ultima equazione.

Fig. 48.

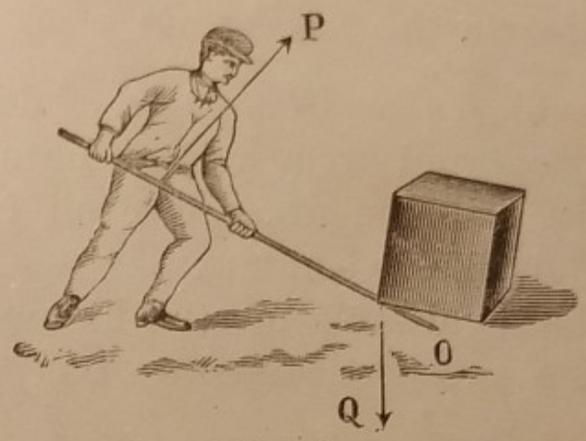


Fig. 49.

2) *La puleggia* o *carrucola* è una ruota che porta sulla periferia una scanalatura, detta *gola*, imperniata dentro un pezzo ad **U** rovesciato detto *staffa*. Si distingue in *fissa* e *mobile*. Nella puleggia fissa (fig. 50) la potenza e la resistenza agiscono sui tratti della fune avvolta sulla gola e l'equilibrio ha luogo solo se la potenza è eguale alla resistenza. Ciò in base alla teoria dell'equilibrio dei corpi girevoli (12): in questo caso infatti le forze agiscono con bracci eguali, che sono raggi della stessa ruota, e per conseguenza dovendo avere momenti eguali devono avere la stessa intensità.

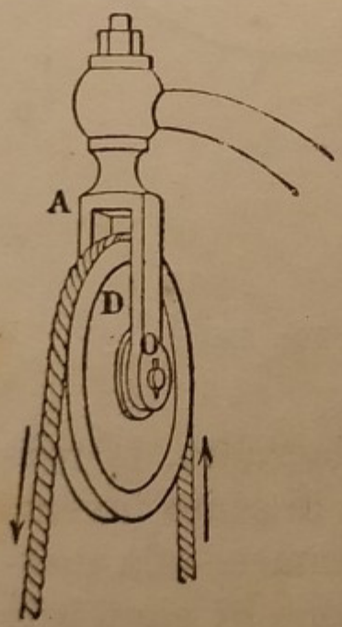


Fig. 50.

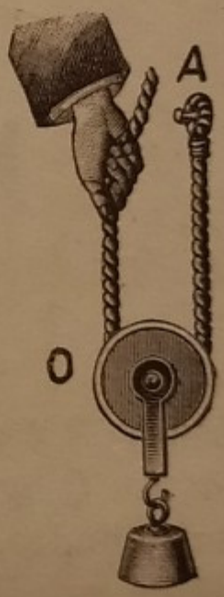


Fig. 51.

Nella puleggia *mobile*, cioè a staffa mobile, consideriamo solo il caso in cui i due *tratti di fune sono paralleli* (fig. 51). Un capo della fune è fissato in *A*; all'altro è applicata la potenza. La resistenza agisce sulla staffa ed è quindi parallela ai due tratti di fune. In questo caso la puleggia tende a girare intorno al punto *O* in cui si appoggia al tratto fisso della fune e si può

quindi considerare come una leva di secondo genere, avente per braccio della potenza il diametro della ruota e per braccio della resistenza il raggio della ruota stessa. Per l'equilibrio occorre dunze che la potenza stia alla resistenza oome 1 : 2, ossia che *la potenza sia metà della resistenza.*

3) *L'asse nella ruota*, è detto anche *tornio*, e in pratica *verricello* od *argano*. È formato di un cilindro e di una ruota uniti solidalmente e girevoli intorno all'asse comune.

La figura 52 mostra la macchina prospetticamente. La po-

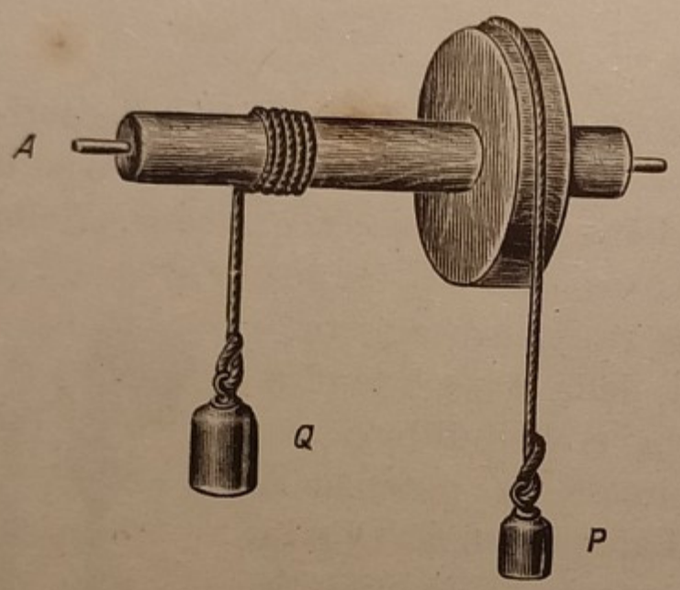


Fig. 52.

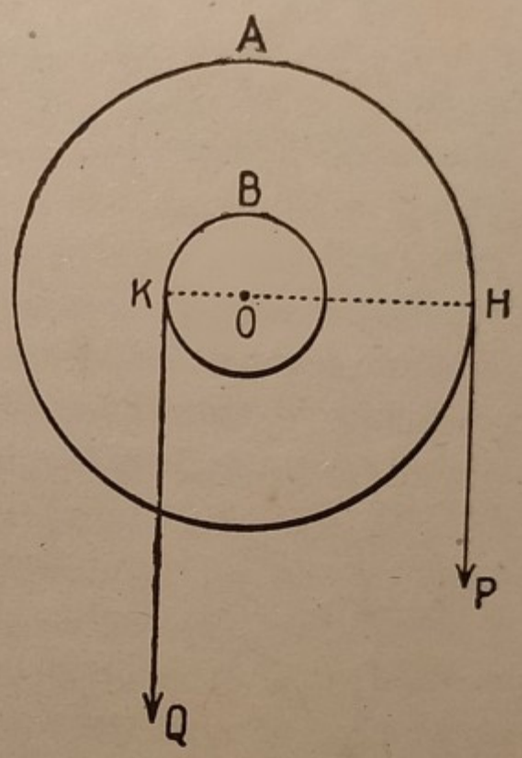


Fig. 53.

tenza P è applicata ad una fune avvolta sulla ruota, la resistenza Q agisce per mezzo di una fune avvolta in senso inverso sul cilindro, sì che le due forze tendono a imprimere alla macchina rotazioni di senso contrario. La condizione di equilibrio apparisce chiaramente dando uno sguardo alla figura 53 che rappresenta la macchina proiettata sopra un piano perpendicolare all'asse di rotazione O.

Sempre per la teoria dei corpi girevoli l'equazione di equilibrio è in valore assoluto:

$$P : Q = OK : OH ,$$

cioè *la potenza sta alla resistenza come il raggio del cilindro sta al raggio della ruota.*

In pratica, anzichè una ruota, al cilindro si applicano delle manovelle, e in tal caso la macchina, se è ad asse orizzontale, si dice *verricello* (fig. 54), se l'asse è verticale, *argano* (figura 55). In tutti i casi, la condizione di equilibrio, ammesso che la potenza agisca all'estremità di una manovella, perpendicolarmente a questa e in piano perpendicolare all'asse di rotazione, è sempre la stessa, cioè *la potenza sta alla resistenza come il raggio del cilindro sta alla lunghezza della manovella, contata tale lunghezza dall'asse al punto di applicazione della potenza.*

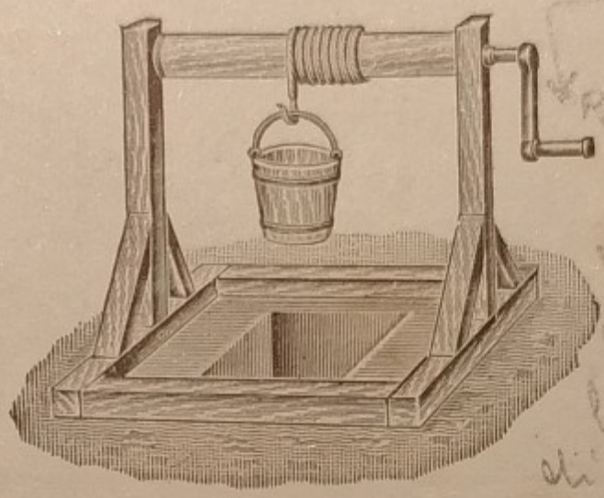


Fig. 54.

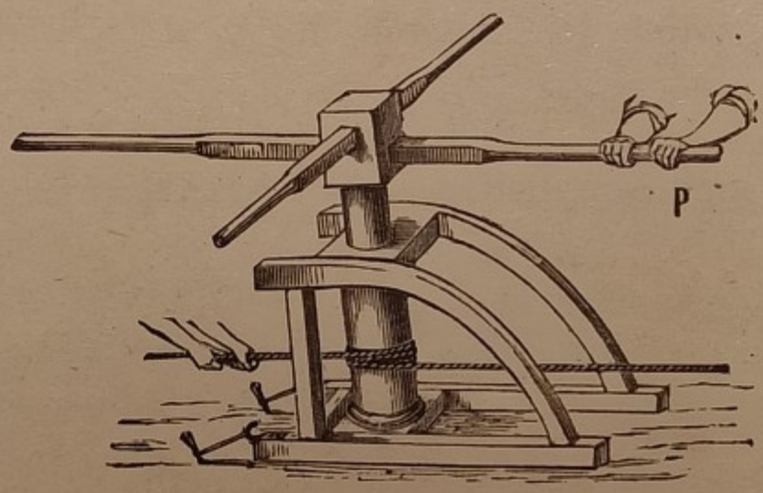


Fig. 55.

17. Piano inclinato; cuneo; vite. — 1) *Il piano inclinato* è un piano che non è nè orizzontale nè verticale, e viene rappresentato da un triangolo rettangolo ABC (fig. 56). L'ipotenusa AB rappresenta in sezione normale il piano inclinato e vien detta *lunghezza* del piano; i cateti AC, CB ne rappresentano rispettivamente l'*altezza* e la *base*. L'angolo ABC dicesi inclinazione del piano.

Consideriamo un corpo pesante M poggiato sul piano, che vi possa scorrere liberamente senza attrito. Il peso MR del

corpo si decompone in due forze (11), la MF parallela alla lunghezza del piano e la MN perpendicolare al piano stesso. Quest'ultima è equilibrata dalla resistenza del piano, la componente utile è solo la MF; che è la forza che determina la discesa del corpo. Talchè è manifesto che per equilibrare il corpo è sufficiente equilibrare la MF, ciò che nel modo più semplice si ottiene applicando al corpo una forza MP eguale ed opposta alla MF.

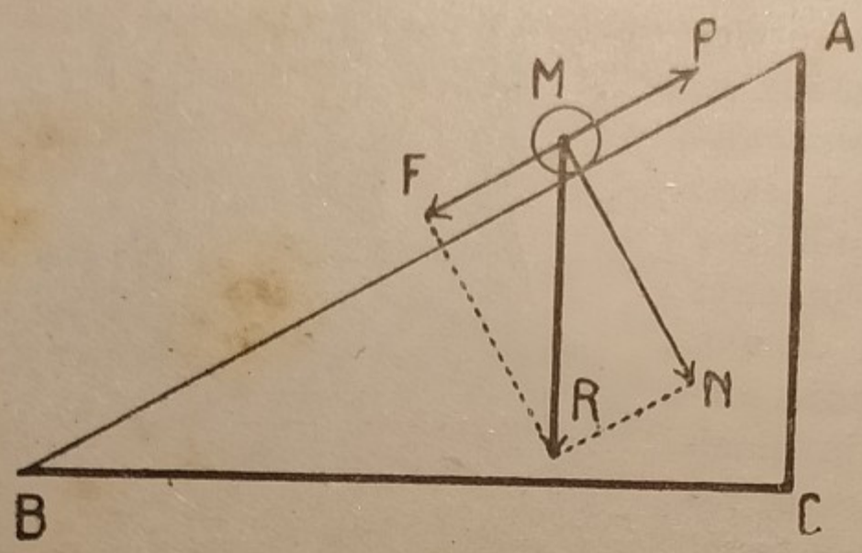


Fig. 56.

Dalla similitudine dei triangoli MFR, ACB si ricava:

$$MF : MR = AC : AB .$$

E facendo per semplicità: $AC = h$, $AB = l$:

$$P : R = h : l ,$$

o anche:

$$P = R \frac{h}{l} ,$$

sicchè *per mantenere il corpo in equilibrio sopra un piano inclinato basta applicargli una forza* — potenza — *parallela al piano, che sta al peso del corpo* — resistenza — *come l'altezza sta alla lunghezza del piano.*

2) *Il cuneo* è un prisma rigido, avente per base un triangolo isoscele e si adopera o per dividere un corpo in due parti o per tenere separati due corpi, introducendo lo spigolo più affilato, che si dice *tagliente*, nella fenditura o nell'intervallo fra i due corpi e applicando la potenza normalmente alla faccia

opposta al tagliente; questa faccia dicesi *testa* del cuneo, e le due facce formanti il tagliente diconsi *fianchi* (fig. 57).

Però nell'esporre la condizione di equilibrio del cuneo, chiameremo testa la lunghezza AB della base del triangolo isoscele (fig. 58) e fianco la lunghezza AC dei lati eguali. Sia

Fig. 57.

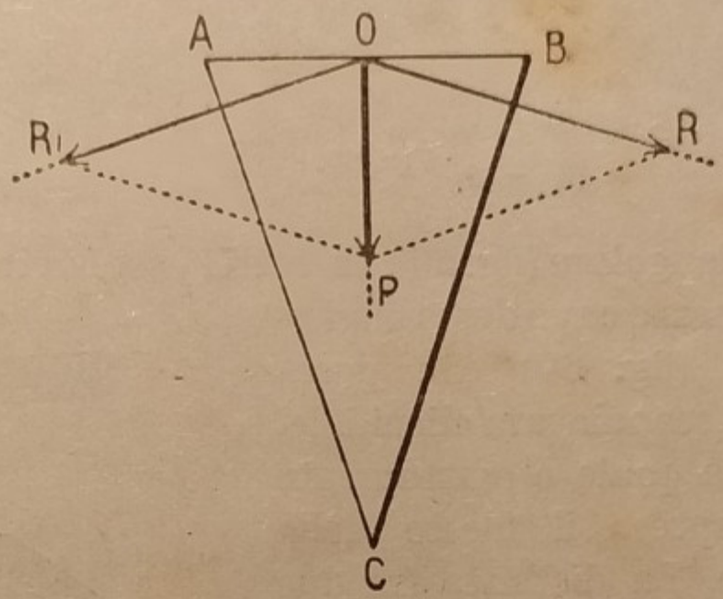


Fig. 58.

OP la potenza applicata perpendicolarmente ad AB nel suo punto di mezzo.

Tale forza si decompone in due R ed R_1 che agiscono perpendicolarmente ai fianchi AC e BC e che vengono equilibrate da due resistenze eguali e contrarie con cui il corpo reagisce contro

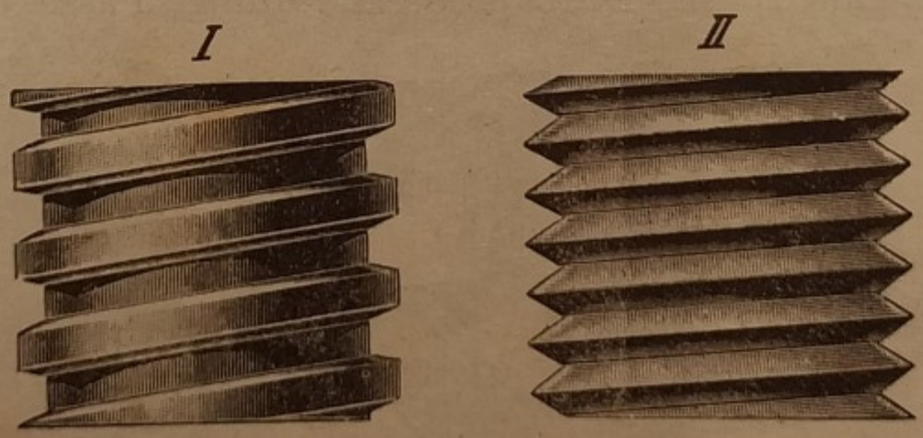


Fig. 59.

i fianchi del cuneo. Con facile ragionamento si riesce a dimostrare che *per l'equilibrio del cuneo la potenza sta a ciascuna delle due resistenze, come la testa sta al fianco.*

Sono cunei i coltelli, gli scalpelli, i chiodi e in genere tutti gli strumenti da punta e da taglio.

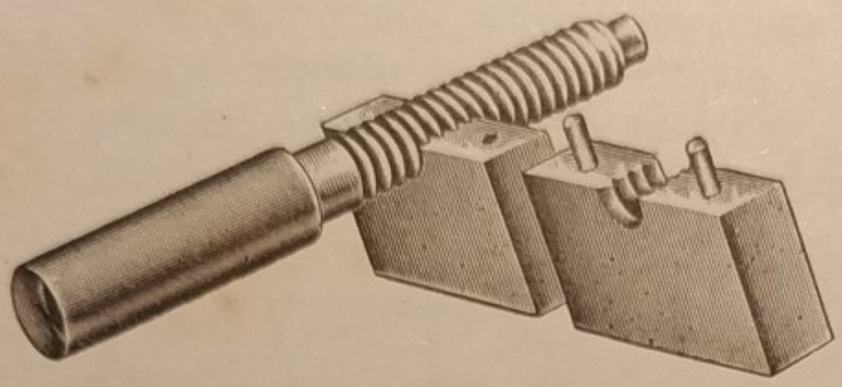


Fig. 60.

3) *La vite* è un cilindro rigido, sul quale è avvolto ad elica un rilievo, detto *filetto*, *pane* o *verme* avente sezione rettangolare o triangolare (fig. 59). In tutti i casi la vite è sempre impegnata in un pezzo cavo detto *madrevite* (fig. 60) che porta una scanalatura elicoidale, nella quale è esattamente compreso il filetto della vite. La distanza fra due spire successive misurata parallelamente all'asse, dicesi *passo* della vite.

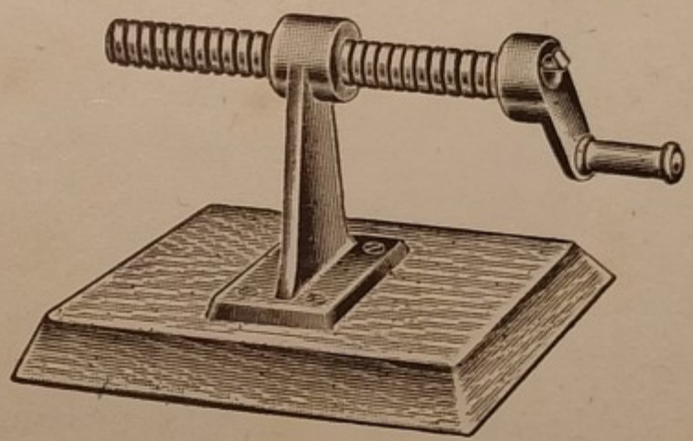


Fig. 61.

In questa macchina troviamo talora mobile la vite (fig. 61), tal altra la madrevite (fig. 62). In tutti i casi, durante la rotazione del pezzo mobile, questo assume, rispetto all'altro, uno spostamento progressivo lungo l'asse, e tale spo-

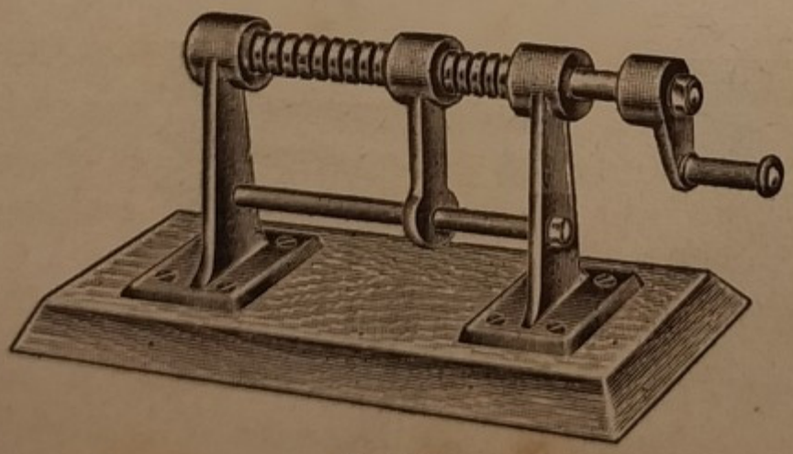


Fig. 62.

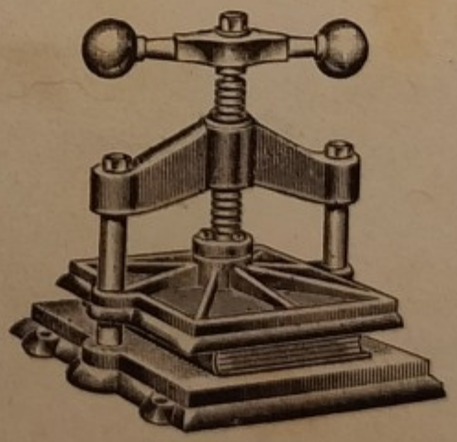


Fig. 63.

stamento per un giro completo è eguale al passo, e per una data frazione di giro equivale alla stessa frazione di passo. Nei torchi la vite è utilizzata per esercitare delle forti pres-

sioni. Nel copialettere (fig. 63), che può prendersi come rappresentante di tali macchine, la potenza agisce alla estremità di una manovella e ammetteremo che essa agisca perpendicolarmente alla manovella e in piano perpendicolare all'asse della vite.

La resistenza è la risultante di tutte le forze che si oppongono all'avanzamento della vite, ed agisce in direzione dell'asse. Nel caso del copialettere la resistenza, prescindendo dagli attriti, è la pressione a cui è soggetto il libro-copialettere e si può dimostrare che *per l'equilibrio la potenza P sta alla resistenza R come il passo h della vite sta alla circonferenza descritta dal punto di applicazione della potenza.*

Cioè si ha che:

$$\frac{P}{R} = \frac{h}{2\pi l},$$

essendo l la distanza del punto di applicazione della potenza dall'asse della vite.

Nei comuni copialettere il passo della vite è di $0^{cm},5$ la lunghezza del manubrio, a partire dall'asse, 15^{cm}, sicchè agendo con due mani, ciascuna colla potenza di 10^{kg}, ciò che equivale ad una forza unica di 20^{kg} agente ad una sola estremità del manubrio, la resistenza R è data evidentemente dall'equazione:

$$R = 20 \times \frac{2\pi \times 15}{0,5} \quad \text{ossia:} \quad R = 3768^{kg}.$$

18. Bilancia e stadera. – Un'importante applicazione della leva la abbiamo nella *bilancia* e nella *stadera*.

La bilancia è formata essenzialmente di una leva (figura 64) detta *giogo*, che di solito ha la forma di un rombo allungato.

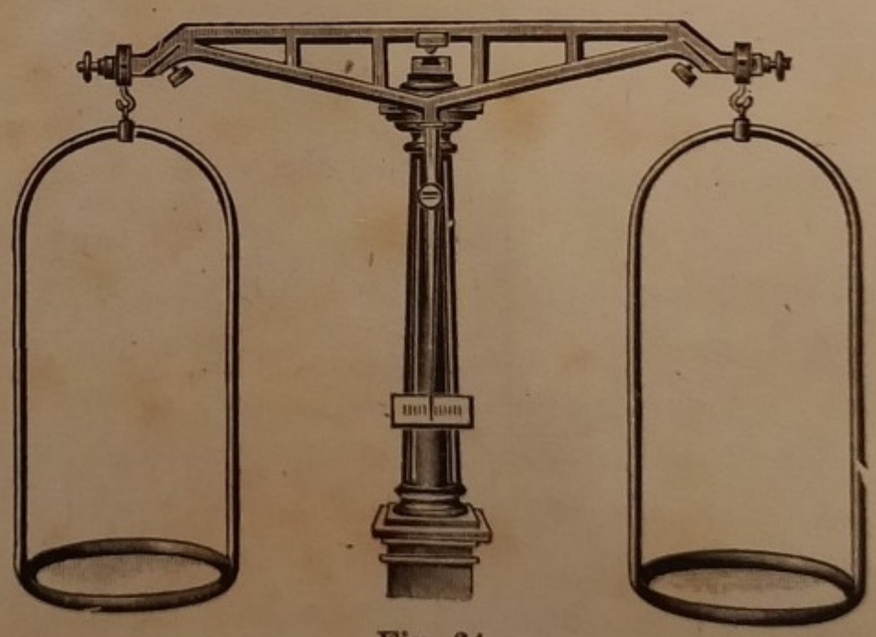


Fig. 64.

Il giogo porta fissato perpendicolarmente un prisma di acciaio P

(figura 65), il cui spigolo *O*, detto anche *coltello*, poggia sopra due piccoli piani *xy* di acciaio o di agata, situati nello stesso piano orizzontale, l'uno davanti e l'altro di dietro al giogo, e portati da una colonna verticale.

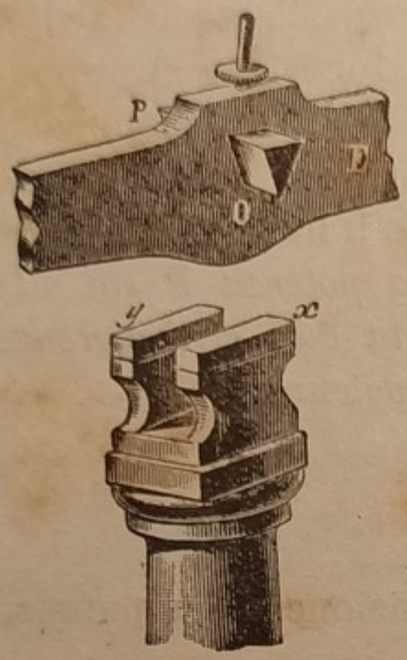


Fig. 65.

Ciascun piattello riposa mediante un uncino sopra un coltello orizzontale di acciaio *B*, fissato all'estremità del giogo (fig. 66). Gli spigoli dei prismi laterali rivolti in alto, sono paralleli allo spigolo del prisma centrale, e i tre spigoli sono sullo stesso piano. Questo sistema di sospensione presenta una grande mobilità, necessaria per avere una buona pesata. Or deve avvenire che quando i piattelli sono scarichi o carichi di pesi eguali, il giogo, dopo aver oscillato liberamente, si disponga *orizzontale* in equilibrio stabile. Essere il giogo orizzontale significa che è orizzontale il piano dei tre coltelli *a*, *o*, *b* (figura 67). Per giudicare della orizzontalità del giogo, a questo si unisce un lungo indice *f* rivolto in basso colla punta di fronte a una graduazione *cc* fissa sulla colonna della bilancia. La bilancia essendo ben regolata il giogo è orizzontale quando l'indice è a zero, cioè corrisponde al segno mediano della graduazione.

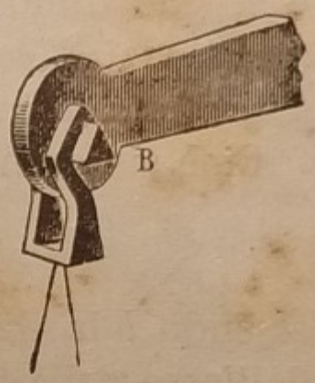


Fig. 66.

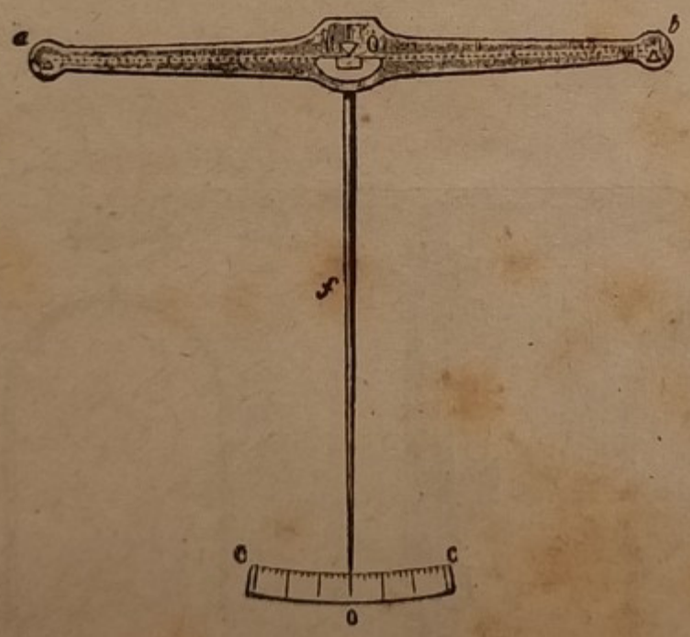


Fig. 67.

Ma occorre anzi tutto regolare la bilancia, e sopra tutto,

servendosi delle viti di livello su cui poggia la base, rendere il piano d'appoggio del coltello centrale ben orizzontale.

Una bilancia deve essere *giusta*, e lo è se, essendo i piattelli carichi di pesi eguali, il giogo libero si mette in equilibrio coll'indice sullo zero. Ciò avviene se in tale posizione il centro di gravità del giogo si troverà sotto al coltello centrale in uno stesso piano verticale coll'asse di sospensione e se i due *bracci* del giogo, cioè le distanze dei coltelli laterali da quello centrale, saranno eguali, giacchè solamente a questa condizione la somma algebrica dei momenti dei pesi eguali potrà essere nulla (12).

La bilancia deve essere inoltre *sensibile*, cioè tale che per una piccola differenza di carica dei due piattelli, l'indice si sposti d'una quantità apprezzabile. Per realizzare tale condizione si richiede che il giogo abbia i bracci lunghi, sia leggero, e che il suo centro di gravità, pur rimanendo al disotto dell'asse di rotazione, senza di che l'equilibrio non sarebbe stabile, gli sia molto vicino.

Il grado di sensibilità di una bilancia può essere misurato dal numero delle divisioni di cui si sposta l'indice per una data differenza di carico, per esempio, di 1 milligrammo. Ma si riscontra che tal grado di sensibilità diminuisce col crescere della carica totale; e la teoria dimostra che ciò dipende dall'inflettersi del giogo sotto l'azione delle cariche. Se si vuole quindi che la sensibilità rimanga indipendente dalle cariche, occorre che il giogo sia robusto, pur conservando la necessaria leggerezza. Ed è perciò che per conciliare lunghezza, leggerezza e robustezza, per quanto è possibile, il giogo è fatto di un unico pezzo, col sistema delle costruzioni a *traliccio* — ponti metallici, torri metalliche e simili — sistemi che assicurano robustezza e leggerezza ad un tempo. Oltre a ciò il metallo di cui si fabbricano i gioghi delle bilancie moderne è resistente e leggero: si usa spesso il *magnalio*, che è una lega di 90 parti di alluminio e di 10 parti di magnesio.

Si costruiscono così delle bilancie di precisione sensibili al milligrammo per una carica su ogni piatto di un chilogrammo. Le bilancie dei laboratori chimici sono di solito sensibili a un decimo di milligrammo per una carica di 200 grammi.

Siccome è impossibile costruire i bracci del giogo rigorosamente eguali, quando in una pesata si richieda una grande esattezza, sarà bene ricorrere a qualche artificio, e uno di questi assai semplice e che dà eccellenti risultati, è il *metodo della tara*.

Esso consiste nel porre sopra uno dei piatti, della tara, ad esempio, dei pallini di piombo, e nell'altro tanti pesi numerati quanti occorrono per equilibrarla. Poi su questo secondo piatto si pone il corpo, il cui peso sarà dato dai grammi e

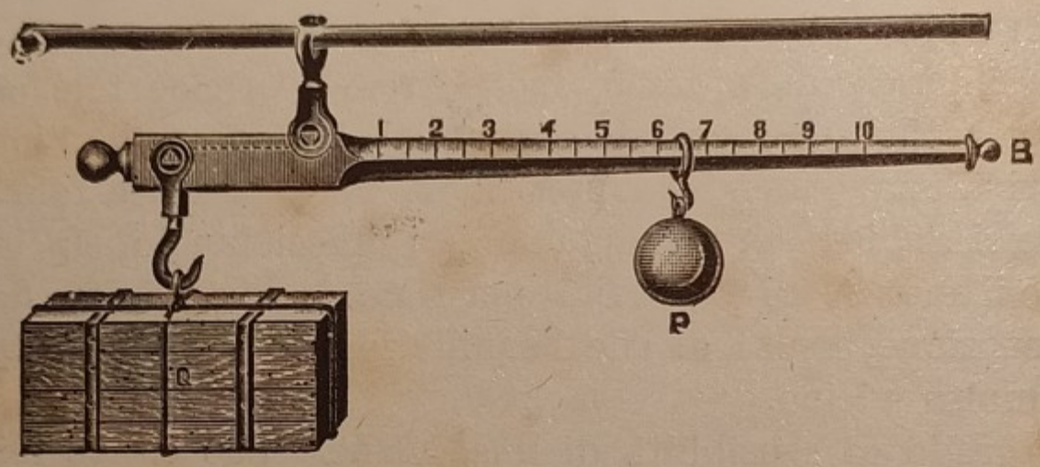


Fig. 68.

dalle frazioni di grammo che si dovranno togliere per ricondurre a zero l'indice del giogo.

Daremo in ultimo un cenno della *stadera* (fig. 68), strumento assai comodo, ma che non consente una grande precisione. È anch'essa formata di un giogo *RB*, ma a bracci disuguali, sul tratto più lungo del quale si fa scorrere un peso costante *P*, detto *marco* o *romano*, fino a ottenere l'equilibrio del corpo, che viene sospeso ad un gancio. Il braccio più lungo della stadera porta una graduazione, ottenuta sospendendo al gancio dei corpi di noto peso. Sulla posizione che deve occupare il romano quando ha luogo l'equilibrio si legge il numero che misura il peso del corpo.

19. Altre applicazioni della leva e della vite. — Le pinze, le tenaglie comuni, le forbici sono leve doppie, ma la loro teoria si riduce a quella della leva semplice, basta supporre fissa una delle lamine. Negli strumenti indicati il braccio di leva, che sta dalla parte della mano, è di solito più lungo del-

l'altro, per cui con una limitata potenza si può equilibrare una resistenza considerevole.

Perciò quando si vuol tagliare colle forbici un cartone un pò' duro, lo si pone, per quanto è possibile, vicino al punto fisso, allo scopo di rendere assai più efficace lo sforzo esercitato dalla mano.

Quando adoperiamo la comune tenaglia per levare un chiodo, dapprima, tenendola normale alla tavola, si stringe fortemente il chiodo in un punto vicinissimo alla tavola; il chiodo risulta stretto fortemente per la grande lunghezza del braccio di leva che sta dalla parte della mano; in seguito, inclinando la tenaglia e facendola appoggiare sulla parte arrotondata, il punto d'appoggio è molto vicino al chiodo, il quale viene così tirato da una considerevole forza, che nei casi comuni può arrivare e superare anche 100 kg.

Lo *schiaccianoci* (fig. 69) è evidentemente una leva di secondo genere, come lo è il remo della barca (fig. 70).

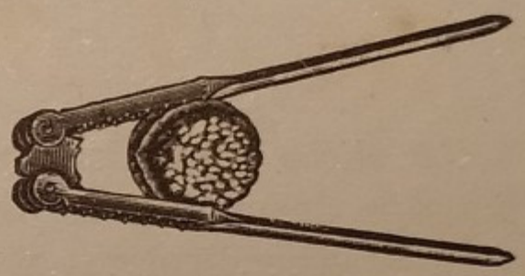


Fig. 69.

Anche nella comune carriola (fig. 71) è realizzata una leva di secondo genere.

Qualche volta la leva è impiegata come leva di 3° genere; la potenza risulta allora superiore alla resistenza che si vuol equilibrare: ciò avviene nelle mollette dello zucchero, nel pedale di certe macchine a cucire,

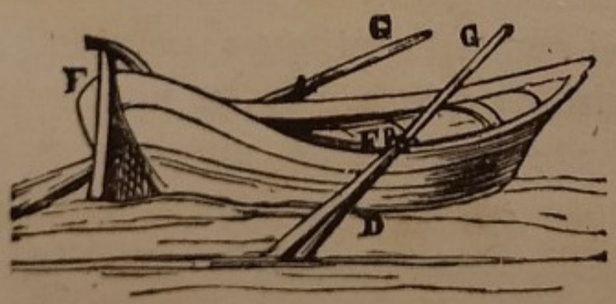


Fig. 70.

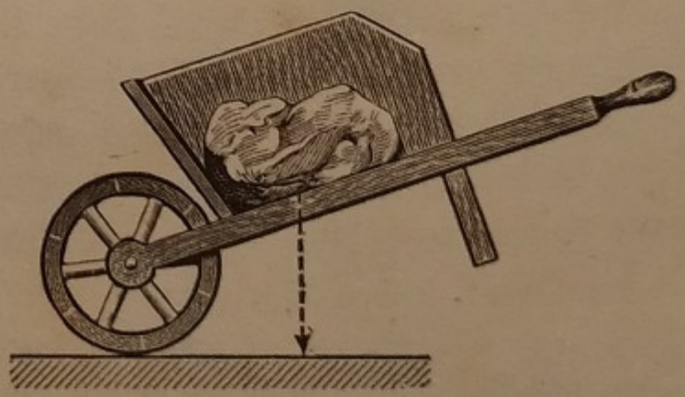


Fig. 71.

nelle forbici usate dal pastore per tosare le pecore. Si ricorre a tali tipi di leva quando la resistenza da vincere sia molto piccola e interessi che il piede o la mano compiano un movimento piuttosto ristretto.

Nelle funicolari si utilizza il principio del piano inclinato, così anche nelle *teleferiche* (fig. 72) per il trasporto dei materiali nelle miniere e in montagna. Per lo stesso principio grandi carichi si possono caricare o scaricare dai veicoli facendoli scorrere su sbarre o tavole inclinate.

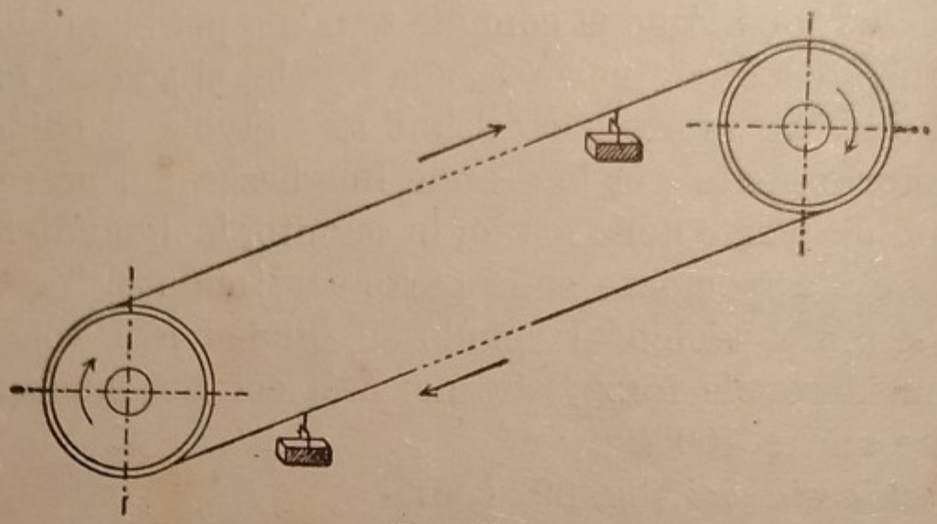


Fig. 72.

Le eliche sono delle vere e proprie viti, destinate a trasformare un moto rotatorio in moto rettilineo secondo una direzione perpendicolare al piano sul quale avviene il primo. In tal maniera funzionano le eliche delle navi e degli apparecchi volanti; in questi casi l'acqua o l'aria fanno l'ufficio di madrevite fissa, perciò avviene che fatta ruotare l'elica, questa e il veicolo che le è unito, assumono un moto progressivo. All'inversa agiscono i comuni *ventilatori*, nei quali la vite girante è fissa e fa da madrevite l'aria, che assume un movimento in un senso o nell'altro a seconda del senso di rotazione delle palette e della loro inclinazione.

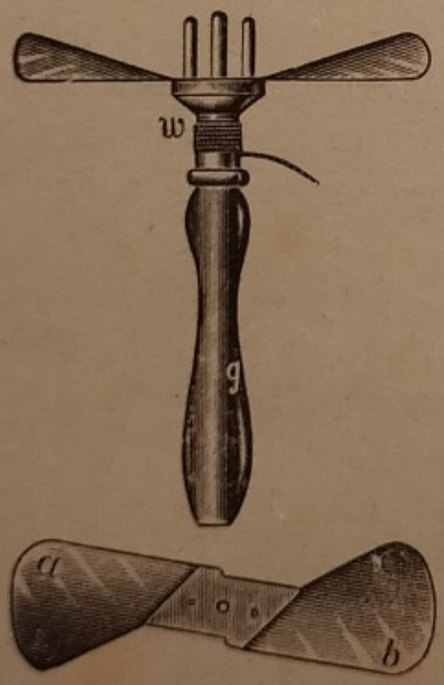


Fig. 73.

Il funzionamento dell'elica delle navi e degli apparecchi aerei si può dimostrare con l'*elica volante* (fig. 73). Un'impugnatura di legno *g* porta fissato in alto secondo l'asse e sporgente parecchi centimetri un piuolo di ferro nel quale è

infilato, sì da potervi girare attorno, un rocchetto di legno *w*. Questo porta fissi due piuoli di ferro laterali a quello sopra indicato. L'elica ritagliata nella forma *ab* da un pezzo di latta, porta tre fori nei quali possono comodamente passare i tre piuoli ed ha le estremità piegate in su a partire da due rette parallele inclinate sulla linea dei tre fori. Messa a posto l'elica, tenendo l'impugnatura *g* colla sinistra, si dà colla destra un forte strappo alla funicella che è avvolta sul rocchetto. L'elica assume un rapido moto rotativo e avvitandosi nell'aria sfugge dal supporto sollevandosi per parecchi metri e facendo un ampio giro nell'aria.

La vite è largamente usata in molti apparecchi destinati a misure di precisione, e prende allora il nome di *vite micrometrica*.

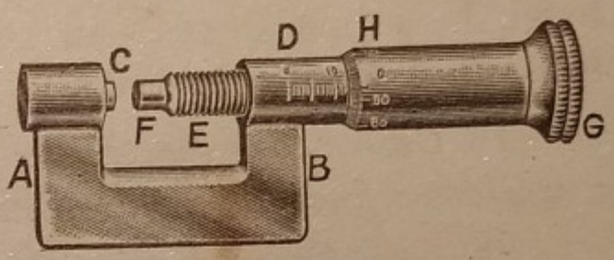


Fig. 74.

Accenniamo al *compasso di spessore*, detto comunemente *palmer*. Lo strumento serve a misurare il diametro di una sfera o di un cilindro, o lo spessore di una lamina a faccie parallele. È costituito di un robusto pezzo metallico *AB* foggiato ad **U** (fig. 74), che da una parte termina con una specie di tallone fisso *C*, e dall'altra con un cilindro *D* che fa da madrevite ad una vite *E* avente il passo di mezzo millimetro. La testa della vite porta un tamburo *H* diviso in 50 parti. Lungo una generatrice del cilindro *D* è segnata una divisione in mezzi millimetri.

L'uso dell'apparecchio si fonda sul fatto, già rilevato, che per ogni giro completo la vite si sposta di una quantità eguale al passo, e per una frazione di giro lo spostamento della vite avviene per la stessa frazione del passo. Or nell'apparecchio descritto le cose son disposte in modo che quando l'estremità *F* della vite poggia contro il tallone *C*, il bordo del tamburo diviso corrisponde alla divisione zero della madrevite, e la divisione zero del tamburo coincide colla generatrice del cilindro *D*, sulla quale è fatta la graduazione.

Se si vuol misurare lo spessore di una lamina a faccie parallele, se ne poggia una delle faccie contro il tallone *C*, e si porta

la vite ad appoggiare col suo estremo F contro l'altra faccia. Si legge allora il numero m delle divisioni scoperte sulla graduazione della madrevite D, e la divisione n del tamburo che coincide colla retta che porta la graduazione; lo spessore cercato è evidentemente m mezzi millimetri più n cinquantesimi di mezzo millimetro, ossia $\frac{m}{2}$ millimetri più n centesimi di millimetro.

Dinamica.

20. Inerzia. — Come si sa, la *dinamica* studia le relazioni che esistono fra le forze e il moto. Essa si fonda sulle seguenti leggi, la prima dovuta in sostanza a *Leonardo da Vinci*, la seconda a *Galileo*, la terza a *Newton*.

1ª *Un corpo persevera nello stato di quiete o di moto rettilineo e uniforme finchè non interviene una forza a cambiare il suo stato.*

2ª *Una forza applicata a un corpo gli comunica un'accelerazione che ha la direzione ed il senso della forza ed è proporzionale alla intensità della forza stessa.*

3ª *Ad ogni azione corrisponde una reazione eguale e contraria.*

Le tre leggi sono dei *postulati*, ossia verità di indole sperimentale; esse si possono solo verificare, non dimostrare, e il loro valore consiste sopra tutto in questo che le *deduzioni* che se ne possono trarre, sono in armonia coi fatti sperimentali.

La 1ª legge, detta *legge d'inerzia*, dichiara che i corpi son dotati di *inerzia*, cioè che i corpi non dotati di vita, non possono mettersi in moto senza una causa esteriore, e ciò combina con tutti i fatti ai quali tutti i giorni assistiamo. Ma il principio afferma anche che un corpo quando è in moto, tende a rimanervi, ciò che può sembrarci inaccettabile dal momento che siamo abituati a vedere che i corpi ricevuto un impulso si muovono più o meno, ma finiscono col fermarsi. Non è però che ciò avvenga per una tendenza dei corpi a rimanere in riposo, ma per gli inevitabili ostacoli che si oppongono sempre al loro moto, quali l'attrito o la resistenza offerta dal fluido, più spesso dall'aria, in cui essi si muovono, Diminuendo tali ostacoli il

corpo si muove più a lungo e se si riuscisse ad eliminarli completamente, rimarrebbe perennemente in moto con velocità costante e il moto si conserverebbe anche rettilineo se nessuna causa esterna intervenisse a mutarne la direzione.

Sono dovuti alla tendenza a persistere nel movimento gli effetti che si producono quando una vettura o un convoglio qualunque vengono bruscamente a fermarsi; i viaggiatori sono, per così dire, proiettati nel senso del movimento, in causa della velocità che possiedono all'atto della fermata. S'immagini che se un freno abbastanza potente riuscisse a fermare istantaneamente un convoglio, gli effetti prodotti sarebbero identici a quelli derivanti dall'urto con un altro convoglio dello stesso peso e della stessa velocità.

E quindi anche all'inerzia si devono attribuire le cadute, spesso seguite da gravi accidenti, di coloro che scendono senza precauzione da una vettura in moto. Infatti tutti i punti del corpo essendo in moto, e i piedi soltanto venendo a fermarsi per il contatto col suolo, le parti superiori del corpo continuano nel loro moto e vengono così lanciate contro il suolo con impeto più o meno grande.

Quando per fissare a un martello il manico si batte l'estremità di questo contro un ostacolo, si utilizza l'inerzia (figura 75).

Fig. 75.

La Terra e i pianeti si muovono intorno al Sole perchè sono animati da una velocità, che conservano, si può dire, inalterata mancando affatto qualsiasi ostacolo. È ancora per inerzia che un proiettile lanciato dall'arma compie la sua traettoria.

21. Proporzionalità fra forza e accelerazione. - Massa. — La 2ª legge è stata in sostanza enunciata da Galileo in seguito a uno studio accurato sulla discesa di corpi pesanti lungo un piano inclinato. Questa legge nella sua parte numerica afferma che se sopra uno *stesso* corpo si fanno agire forze costanti

— costanti in intensità e direzione — le cui intensità sieno $F_1 F_2 F_3 \ldots$, queste producono accelerazioni $a_1 a_2 a_3 \ldots$ tali che:

$$F_1 : F_2 : F_3 : \ldots = a_1 : a_2 : a_3 : \ldots$$

ossia:

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{F_3}{a_3} = \ldots ;$$

cioè tra le intensità delle forze che agiscono su di un corpo e le rispettive accelerazioni esiste tal legame che il rapporto $F : a$ rimane costante. Tale rapporto costante, che quindi innanzi indicheremo con m, si è convenuto di chiamarlo *massa meccanica*, o semplicemente *massa* del corpo; per cui, per convenzione, l'eguaglianza che definisce la massa d'un corpo, è:

$$\frac{F}{a} = m . \qquad (1)$$

Da questa si ottiene:

$$F = am ; \qquad (2)$$

eguaglianza che ci dice che il valore della forza è il prodotto del valore dell'accelerazione per quello della massa.

Per la misura della massa di un corpo i Fisici hanno, per *convenzione*, adottato come unità il *grammo-massa*, che è *la millesima parte della massa del chilogrammo campione di Parigi*, ossia, salvo una piccolissima differenza (8), la *massa* di un centimetro cubo d'acqua distillata a 4° C.

Una forza che agisce su tutti i corpi è la gravità terrestre, e il *peso* di un corpo è la forza che ne determina la caduta. Per eliminare tuttavia altre cause che possono modificarne la caduta, ammetteremo che essa avvenga nel vuoto. Nell'aria, la caduta dei corpi diversi si effettua differentemente: una piuma, ad es., e una moneta cadono dalla stessa altezza in tempi diversi, ma *nel vuoto tutti i corpi impiegano lo stesso tempo a cadere dalla stessa altezza*, come si vedrà più innanzi.

Stabilito ciò, possiamo dire che i corpi nello stesso luogo acquistano la stessa accelerazione, che indicheremo con g, e che chiameremo *accelerazione della gravità*. Per conseguenza se due corpi A, A' hanno masse m, m' e pesi p, p' in un luogo dove l'accelerazione è g, si ha per la (2),

$$p = mg ; \qquad p' = m'g , \qquad (3)$$

le quali divise membro a membro dànno:

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'}$$

cioè: *in uno stesso luogo le masse di due corpi sono proporzionali ai pesi corrispondenti.* Da ciò risulta che il confronto fra le masse di due corpi è condotto al confronto dei pesi che i corpi hanno nello stesso luogo. Sicchè se in un caso particolare fosse $p = p'$, sarebbe anche $m = m'$.

Ora avendo una bilancia accompagnata da una *pesiera*, che è una scatola contenente i pesi campioni, cioè dei blocchi metallici le cui *masse* stanno fra loro secondo rapporti numerici noti, si può formare un insieme di masse che posto su uno dei piatti *pesi* quanto il corpo di cui si vuol conoscere la massa. Per conseguenza il numero che misura la massa dei pesi campioni misura anche la massa del corpo.

E non sarà inutile avvertire a questo punto che la bilancia può solo indicarci l'eguaglianza di due pesi e quindi di due masse; essa ci può dare il valore della massa di un corpo, ma non ci dà direttamente il valore del peso. Se si vuol questo, occorre, dopo avuta la massa del corpo, moltiplicare la massa per l'accelerazione g della gravità nel luogo dove si fa la pesata.

22. Unità dinamica di forza. — Torniamo ora alla formola (2); essa ci dice che F è eguale ad *uno*, se a è *uno* ed m è *uno*; considerazione questa che ha permesso di scegliere una *unità di forza*, che è stata detta *unità dinamica di forza*. Essa *è quella forza che agendo sopra il grammo-massa gli comunica l'accelerazione di 1 cm. al secondo*, ed ha il nome di *dina*. Dimodochè, se vogliamo misurare una forza, la faremo agire sopra un corpo di *nota* massa, e misureremo l'accelerazione prodotta; il numero che si ottiene facendo il prodotto del valore della massa, in grammi-massa, per quello dell'accelerazione, in centimetri al secondo, darà il valore della forza in *dine*. Questa misura delle forze è detta *misura dinamica*, misura cioè desunta dall'*effetto dinamico* d'una forza, per distinguerla dalla *misura statica*, che si eseguisce col dinamometro e nella

quale il valore di una forza è ottenuto con un criterio d'equilibrio.

Del resto anche la forza che abbiamo chiamata grammo-peso (8) si può considerare sotto l'aspetto dinamico; infatti essa è la forza che determina la caduta di 1 grammo-massa. Però l'accelerazione che la forza di gravità produce è qualche poco diversa nei diversi luoghi della superficie terrestre (27). Alla latitudine di 45° è circa $980^{cm},5$, di modo che a tale latitudine:

$$1 \text{ grammo-peso} = 980,5 \text{ dine}$$

e

$$1 \text{ chilogrammo-peso} = 980.500 \text{ dine.}$$

23. Azione e reazione. — La 3ª legge enunciata al principio del § 20, detta *legge dell'azione e della reazione*, ha come le altre la sua facile illustrazione. Citiamo alcuni fatti.

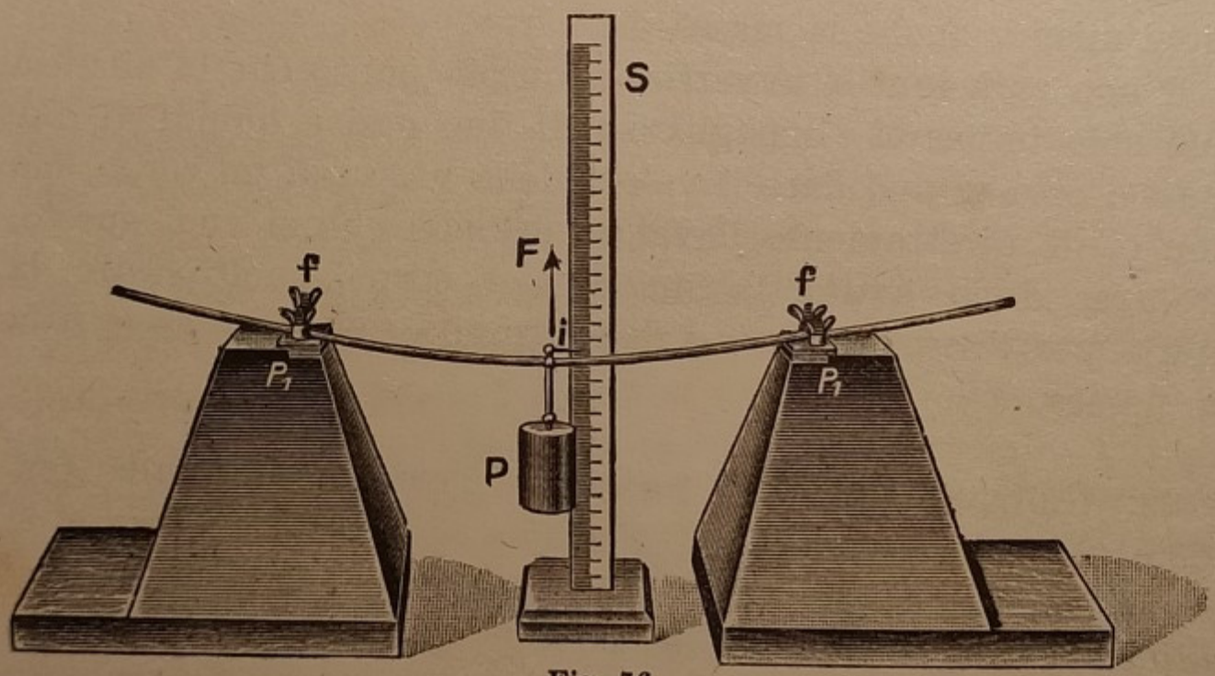


Fig. 76.

Se si sospende un corpo P nel punto di mezzo di una lamina elastica appoggiata agli estremi (fig. 76), si osserva che la lamina si piega fino al punto che la risultante F delle forze elastiche che vi si destano arriva a equilibrare il peso P del corpo; sarà cioè $F = P$. Se in seguito al corpo P se ne sostituisce un altro più pesante, la sbarra si fletterà maggiormente e quindi maggiore riescirà la reazione F dovuta all'elasticità, ma tal forza raggiungerà anche in questo caso un'intensità

eguale al peso del corpo. Il risultato finale sarà sempre che all'*azione* — peso del corpo — corrisponderà una *reazione* — forza elastica della molla — eguale e contraria.

Una calamita attira un pezzo di ferro, ma questo attira la calamita, come si può provare mettendo la calamita a galleggiare sopra l'acqua poggiandola su un pezzo di sughero e accostandovi un pezzo di ferro.

La Terra attira i corpi che stanno alla sua superficie, ma questi attirano egualmente la Terra verso di loro, di modo che se si potesse immobilizzare il corpo, dovrebbe la Terra muoversi verso i corpi stessi.

Nello sparo di un'arma da fuoco, la violenta combustione della carica determina una pressione contro il fondo dell'arma e una pressione eguale e contraria sulla base del proiettile; ne consegue che l'arma e il proiettile acquistano delle velocità in sensi opposti e si verifica che se M, m, V, v sono rispettivamente le masse e le velocità dei due corpi, in ogni istante del tempo che dura l'azione dell'esplosivo, e quindi anche nell'istante in cui il proiettile abbandona l'arma, si ha l'eguaglianza:

$$MV = mv\,;$$

cioè:

$$V : v = m : M\,,$$

vale a dire le velocità dei due corpi sono inversamente proporzionali alle masse.

Il nostro fucile da guerra Mod. 91 ha una massa di 3900 grammi-massa, la pallottola di 10,45 grammi-massa, che parte dal fucile con la velocità di 700^{m} al secondo. Il fucile rincula con la velocità di $1^{m},87$.

24. Moto di caduta dei gravi. — In altre occasioni è stato detto che la forza di gravità determina la caduta di un corpo lasciato libero. Tal forza è un caso della gravitazione universale scoperta dal Newton e della quale questo sommo scienziato dette le leggi, contenute nella formola:

$$F = k\,\frac{Mm}{r^2}$$

nella quale F è la forza mutua attrattiva esercitantesi tra il corpo e la Terra, ossia il peso del corpo; M ed m sono le masse della Terra e del corpo ed r la distanza del corpo dal centro della Terra. Il coefficiente k ha un valore numerico di $6{,}6 \times 10^{-8}$ se le masse vengono misurate in *grammi-massa*, r in *centimetri*, ed F in *dine*; tale coefficiente vien detto *costante della gravitazione universale*. In concreto significa che due masse ciascuna di 1 grammo-massa, messe a 1 cm. di distanza, si attirano con la forza di $6{,}6 \times 10^{-8}$ dine.

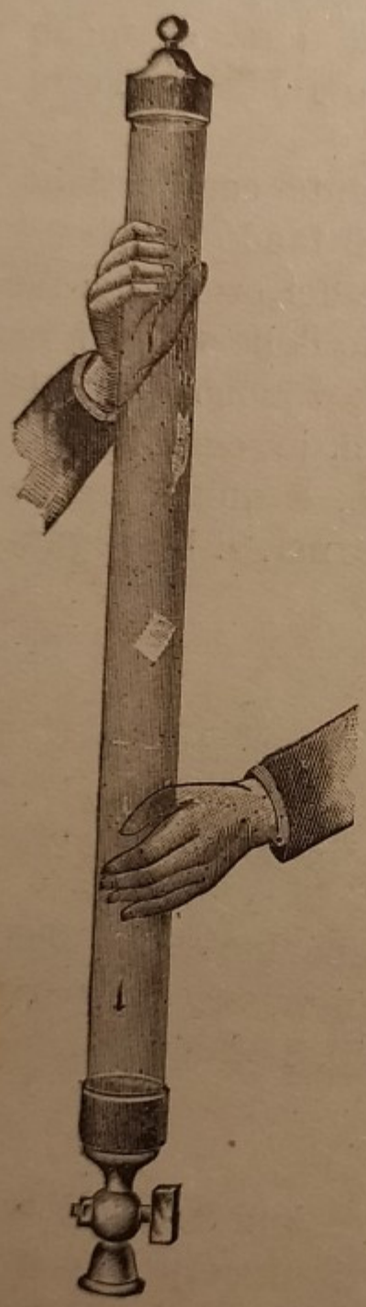


Fig. 77.

La formola sopra riportata dice che il peso di un corpo varia con r, ossia con la distanza dal centro della Terra, e diminuisce coll'aumentare di questa.

L'esperienza ha provato che un blocco di un chilogrammo coll'abbassamento di 25 metri, subisce un aumento di peso di $37 : 5 = 7{,}4$ milligrammi.

Tuttavia tale variabilità non produce effetto sensibile finchè si tratta di piccole differenze di altezza, ed è perciò che quando un corpo discende da piccola altezza potremo ammettere, senza sensibile errore, che il suo peso sia una forza costante.

Ciò premesso, vediamo come si effettua la *caduta libera*, cioè la *caduta nel vuoto* dei gravi.

Tutti i corpi cadendo nel vuoto acquistano la stessa accelerazione; ciò è dimostrato con il *tubo di Newton*. Esso è un tubo cilindrico (fig. 77) in vetro, lungo da 1,50 a 2 metri, del diametro da 7 ad 8 centimetri, ed è terminato alle estremità da due guerniture metalliche, una delle quali porta un rubinetto e un giunto da poterlo avvitare alla macchina pneumatica. Si pongono nel tubo vari corpi: una pallina di piombo, un pezzetto di sughero, una barba di penna, ecc. Dopo fatto il vuoto, si rovescia rapi-

damente il tubo; tutti i corpi cadono e arrivano insieme alla estremità inferiore.

Lasciando rientrare un po' d'aria e rifacendo la prova, i corpi leggeri sono in ritardo tanto più forte quanto maggiore è la quantità d'aria immessa nel tubo.

Il ritardo dovuto alla resistenza dell'aria si mostra anche posando sopra una moneta, di dimensioni un po' grandi, un pezzetto di carta più piccolo; tenendo la moneta orizzontalmente la si lascia cadere da una certa altezza. Il metallo apre il passaggio alla carta e la sottrae alla resistenza dell'aria e la carta cade come nel vuoto, colla stessa velocità del metallo. Però se si tratta di corpi molto pesanti e poco voluminosi, come delle sferette metalliche, e di velocità non grandi, l'influenza perturbatrice dell'aria riesce trascurabile. Ma lo studio quantitativo del moto di libera caduta riesce difficile per la rapidità con cui si effettua; già in 3 secondi lo spazio percorso è 44 m. Galileo ricorse a un felice artifizio per *rallentare* il movimento del corpo cadente senza variarne la legge, facendolo discendere lungo un piano inclinato. È noto (17) che la forza che sollecita un corpo a scendere lungo un piano inclinato è la componente F del peso R del corpo in direzione parallela al piano. Or per la legge di proporzionalità fra le forze e le rispettive accelerazioni (21), indicando con a la accelerazione acquistata dal corpo che scende lungo il piano, e con g quella della gravità, cioè quella che assume il corpo cadendo nel vuoto si ha:

$$F : R = a : g$$

Ma per la teoria del piano inclinato (17)

$$F : R = h : l$$

quindi

$$a : g = h : l$$

essendo h ed l l'altezza e la lunghezza del piano.

L'ultima formola ci dice che l'accelerazione a nella discesa lungo il piano può risultare una frazione quanto piccola si vuole di g, basta inclinare il piano in modo che sia piccolo il rapporto $h : l$.

In tal modo si può con modesti mezzi, come quelli posseduti da Galileo, misurare gli spazi percorsi dal corpo che discende lungo il piano inclinato e i tempi impiegati a percorrerli.

Le esperienze di Galileo portarono a risultati concludenti: qualunque fosse l'inclinazione del piano *gli spazi percorsi dal corpo risultarono proporzionali ai quadrati dei tempi impiegati a percorrerli*, vale a dire il moto del corpo in tali condizioni è *naturalmente accelerato*, quindi obbedisce alla nota formola del § 6.

$$s_t = \frac{1}{2} at^2 .$$

Il Galilei logicamente ammise la validità della legge enunciata anche per un'inclinazione del piano di 90°, cioè per la caduta libera. In questo caso l'accelerazione è g quindi la formola precedente diviene

$$s_t = \frac{1}{2} gt^2 .$$

L'accelerazione g della gravità, come verrà spigetato nel § 27 ha un valore qualche po' variabile alla superficie terrestre, oscillando intorno a 980 cm. al secondo. Perciò nel 1° secondo di caduta un grave percorre uno spazio $s_1 = \frac{1}{2} g$, cioè $s_1 = 490$ cm;

in 2 secondi percorre $s_2 = 4 \times \frac{1}{2} g = 4 \times 490 = 1690$ cm.

in 3 » » $s_3 = 9 \times \frac{1}{2} g = 9 \times 490 = 4410$ »

. . . . . .

in 10 » » $s_{10} = 100 \times \frac{1}{2} g = 100 \times 490 = 49000$ cm.

25. Pendolo semplice. — Si dice *pendolo* un corpo qualunque pesante mobile intorno ad un asse orizzontale fisso, detto asse di sospensione, che sta al disopra del suo centro di gravità. Tale pendolo viene anche detto *pendolo fisico* o *pendolo composto*, per distinguerlo dal pendolo semplice.

Un *pendolo semplice* è formato di un punto materiale pesante A (fig. 78) sospeso a una delle estremità d'un filo inestensibile e senza peso; l'altra estremità del filo è sostenuta da un punto fisso O. Questo, come si comprende, è un pendolo ideale e serve per stabilirne teoricamente le leggi del movimento.

Il movimento d'un pendolo è dovuto al suo peso. Quando il filo è lasciato verticale, il peso di A agente nella direzione

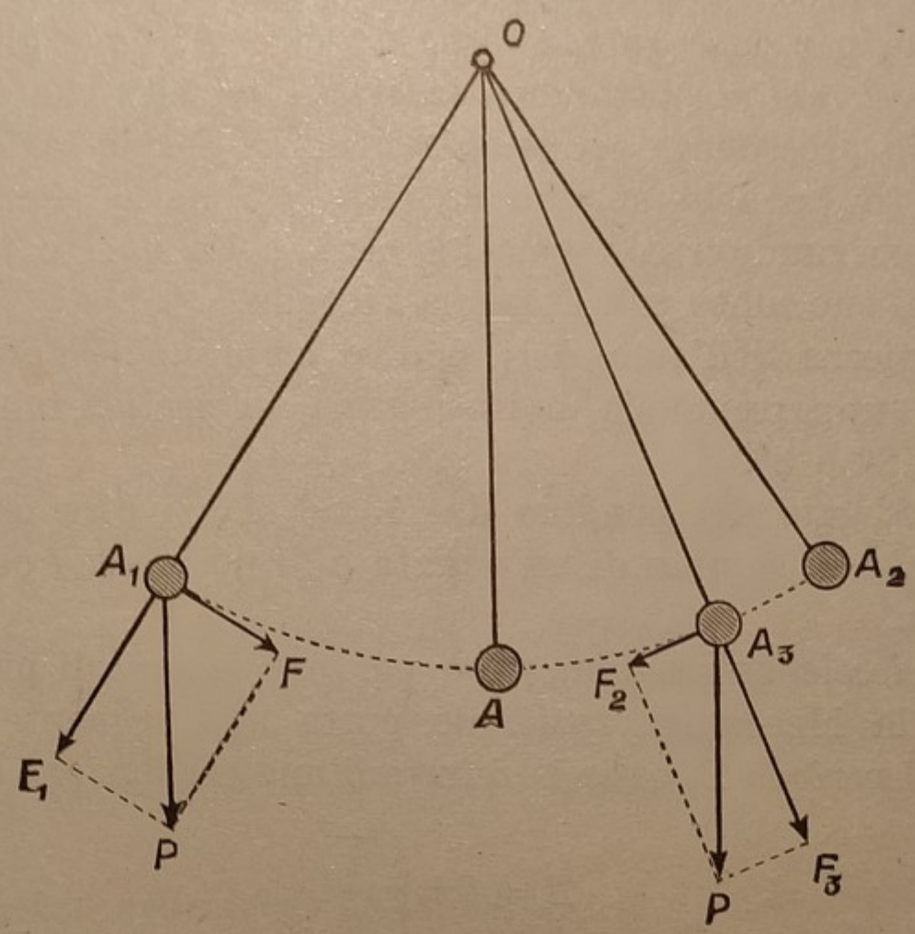


Fig. 78.

del filo è equilibrato dalla resistenza del punto fisso e il pendolo è in riposo. Se invece lo si porta in OA_1 e lo si abbandona, si mette ad oscillare da una parte e dall'altra del punto A in un piano verticale invariabile. Infatti il peso A_1P del pendolo si decompone secondo la regola del parallelogramma in due forze A_1F_1 e A_1F nel piano $PA'O$. La componente A_1F_1 che agisce nella direzione del filo, ha per solo effetto di tenderlo; la componente perpendicolare A_1F produce il movimento. Questa componente rimane sempre nel detto piano, quindi il punto A_1 resta in tal piano e descrive un arco di circonferenza di centro O. Il pendolo così scende da A_1 con moto

accelerato e giunge in A con la velocità massima ed oltrepassa tal posizione per inerzia; ma allora la componente del peso in direzione perpendicolare al filo, che per una certa posizione A_3 del pendolo è la A_3F_2, agisce come forza *ritardatrice*, ed il pendolo per conseguenza si muove con moto *ritardato*.

Non sarebbe difficile dimostrare che dopo aver percorso in salita l'arco AA_2, eguale all'arco A_1A, il pendolo ha velocità zero, per conseguenza ritorna verso A, dove giunge con moto *accelerato* acquistandovi la stessa velocità che aveva nel passaggio precedente per lo stesso punto. Per le ragioni sopra esposte, il pendolo sale in seguito con moto *ritardato* fino in A_1, arrivandovi con velocità zero, e da questo istante riprende il suo moto con la stessa vicenda.

L'ampiezza dell'arco AA_1 si dice *ampiezza dell'oscillazione*, che noi supporremo sia molto piccola, in pratica tale che non superi i 2° o 3°.

Il passaggio del pendolo da A_1 ad A_2 si dice oscillazione *semplice*, e la somma di un'andata e di un ritorno oscillazione *completa*.

Per *piccole* oscillazioni, cioè per oscillazioni di piccola ampiezza, la Meccanica razionale porta alla seguente formola, che dà il *periodo* T, ossia la durata d'una oscillazione completa:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (1)$$

nella quale T è il periodo misurato in secondi, l la lunghezza del pendolo e g l'accelerazione della gravità nel luogo dove il pendolo oscilla. Dalla formola apparisce che T è indipendente dall'ampiezza. Ciò a rigore non corrisponde al vero; il periodo è veramente funzione dell'ampiezza, e cresce con questa, ma di una quantità praticamente trascurabile.

Le oscillazioni del pendolo obbediscono a quattro leggi:

1° *Le piccole oscillazioni di uno stesso pendolo sono isocrone, cioè si compiono nello stesso tempo.*

2° *Il periodo è indipendente dalla massa del pendolo e dalla sostanza di cui è formato.*

3° *Il periodo è direttamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza.*

4° *Il periodo è inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'accelerazione della gravità nel luogo dove il pendolo oscilla.*

La 3ª e la 4ª legge sono evidentemente esplicite nella formola (1) sopra esposta.

La 2ª, sotto altra forma, non è altro che la legge enunciata nel § 24, per cui nello stesso luogo tutti i corpi cadono colla stessa accelerazione.

Tali leggi però, che fin qui vanno considerate come semplici deduzioni matematiche, a rigore non sarebbero verificabili, perchè un pendolo semplice non si può realizzare.

Si può tuttavia con facilità preparare un pendolo, che equivale con grande approssimazione a un pendolo semplice, con una piccola sfera sospesa ad un filo di peso trascurabile. Si può ritenere che questo pendolo si comporti come un pendolo semplice avente per lunghezza la distanza dell'asse di sospensione dal centro della sfera. Il calcolo infatti dimostra che usando una sfera del raggio di 1 centimetro, se la distanza dell'asse di sospensione dal centro della sfera è 1 metro, la lunghezza del pendolo semplice isocrono, cioè che ha la stessa durata di oscillazione, è di metri 1,00004.

26. Verifica delle leggi del pendolo. — Per la verifica delle tre prime leggi ci serviremo adunque di pendoli formati con delle sferette sostenute da leggeri cordoncini: così la 1ª legge si verifica mettendo in moto un pendolo, di guisa che le prime oscillazioni abbiano piccola ampiezza; con un cronometro si determina la durata di 100 oscillazioni, e poi la durata di altre 100 e così di seguito. L'ampiezza delle successive oscillazioni va gradualmente diminuendo per ragione degli attriti e della resistenza dell'aria. Malgrado ciò si constata che la durata delle diverse serie rimane invariata.

Per verificare la 2ª legge si formano due pendoli con due sferette, una, ad esempio, di sughero D, l'altra di piombo C (fig. 79), sospese a fili della stessa lunghezza; si riscontrerà facilmente che il periodo è perfettamente lo stesso.

Per la 3ª legge si costruiscono col detto sistema dei pendoli *A*, *B*, *C* (fig. 79) lunghi 1, 4, 9 rispettivamente, ad es. 20, 80, 180 centimetri; usando un semplice cronometro a scatto, si riscontra che 30 oscillazioni del primo, 15 del secondo, 10 del terzo hanno la stessa durata; cioè che i periodi stanno fra loro come 1 : 2 : 3.

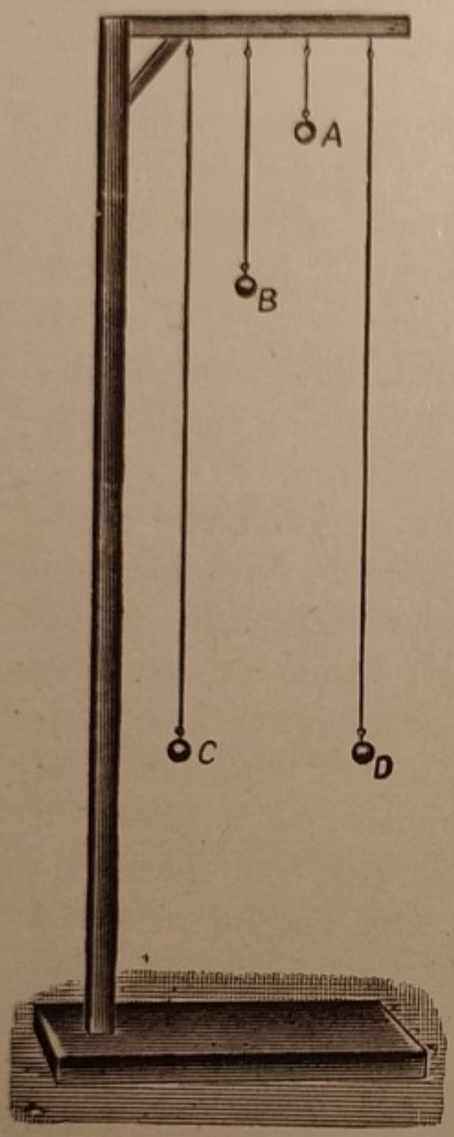


Fig. 79.

Per la 4ª legge ci limiteremo a fare una verifica semplicemente qualitativa, ossia a verificare che il periodo *diminuisce* col *crescere* dell'accelezione, ossia della forza agente sul pendolo.

A è una pallottola di ferro sospesa ad un doppio cordoncino (fig. 80); sotto di essa è posta una elettrocalamita *E* (1). Si fa oscillare il pendolo quando la elettrocalamita è inattiva; in tal caso il pendolo oscilla sotto l'azione della sola gravità.

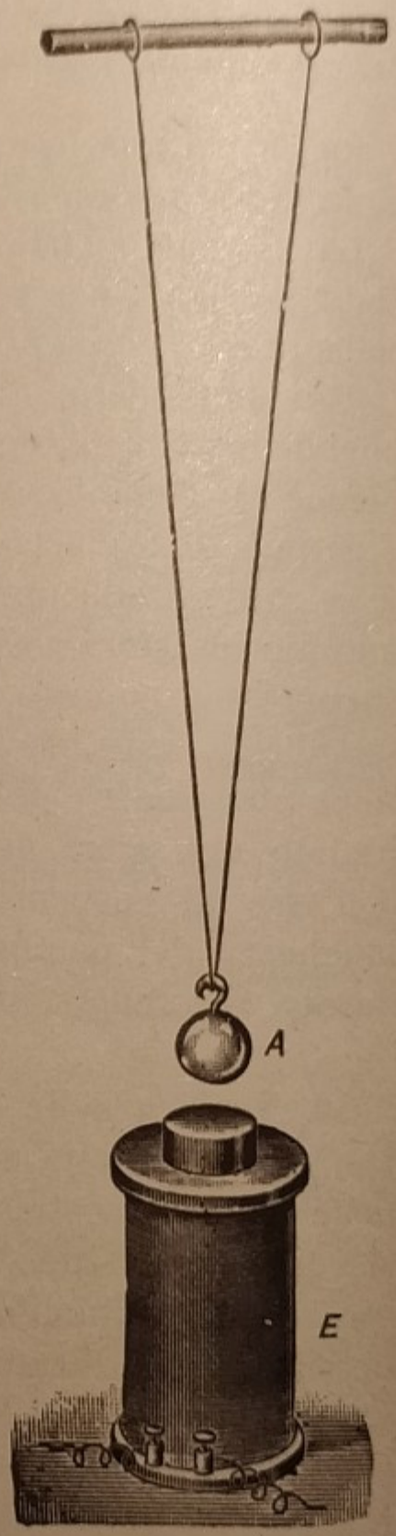


Fig. 80.

(1) Un'elettrocalamita è formata di un cilindretto di ferro dolce sopra il quale è avvolto in molti giri un filo di rame ricoperto di seta o di cotone per tutta la sua lunghezza. Il nucleo di ferro che non è naturalmente calamitato, lo diventa facendo passare una corrente elettrica nel filo di rame, e cessa di esserlo al cessare della corrente.

Si eccita poi la elettrocalamita, nel qual caso la sferetta è soggetta a una forza maggiore, perchè all'azione della gravità si aggiunge quella della calamita; si osserverà che le oscillazioni si compiono con maggiore rapidità.

27. Misura dell'accelerazione della gravità. — La misura di questa grandezza è fatta con speciali pendoli paragonabili a pendoli semplici. Il processo è il seguente: si misura il periodo di oscillazione T del pendolo e la lunghezza l del pendolo stesso e si sostituiscono tali valori nella formola (1) del precedente paragrafo, che risolta rispetto a g diventa:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Le misure eseguite mostrano che l'accelerazione della gravità è variabile da un luogo all'altro della superficie terrestre, come apparisce da pochi dati che qui riportiamo:

Equatore, al livello del mare	cm.	978,07	al secondo
Roma » »	»	980,38	»
Latitudine 45° » »	»	980,61	»
Torino	»	980,52	»
Parigi, al pavimento del Pantheon	»	981 —	»
Polo, dedotto da misure fatte in Lapponia	»	983,10	»

In maniera generale g varia dunque colla latitudine e cresce con questa, mentre diminuisce coll'altitudine, come fu accennato nel § 24.

28. Applicazione del pendolo agli orologi. — Un orologio ha come organi essenziali il *motore*, il *rotismo* detto anche *minuteria*, il *regolatore* e lo *scappamento*.

Il *motore* (fig. 81) può essere costituito da un peso fissato all'estremità di un cordoncino avvolto sopra un cilindro orizzontale T solidale con una ruota dentata R. Questa ruota tende ad assumere un movimento accelerato; ma in realtà ad essa è concesso solo di muoversi a scatti ad intervalli di tempo eguali. Qualche volta l'organo motore è una molla, come avviene negli orologi mobili in genere.

Il *rotismo* è formato di una serie di ruote dentate, l'una delle quali ingrana con la ruota dentata *R* del motore e ne trasmette il moto allo scappamento; gli assi di tre di queste ruote portano le lancette delle ore, dei minuti e dei secondi.

Il *regolatore* è formato spesso da un pendolo le cui oscillazioni mantengono un'ampiezza costante, malgrado l'attrito e la resistenza dell'aria, per il fatto che dagli organi dello scappamento

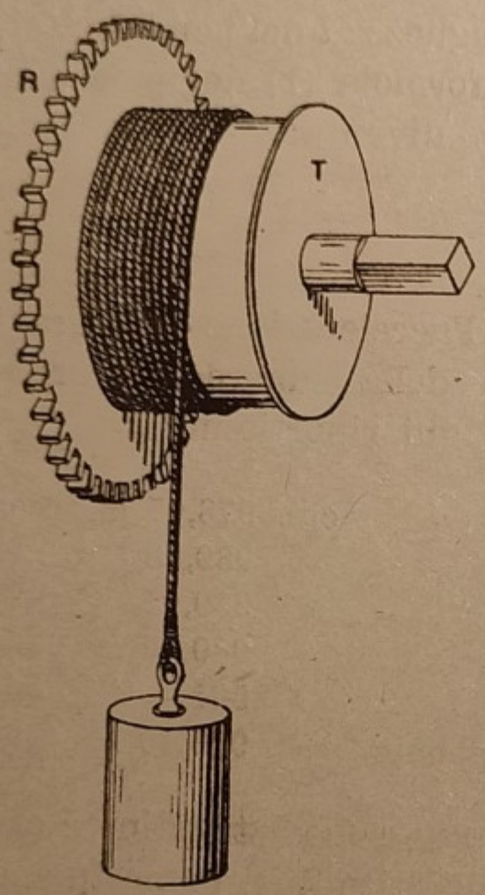


Fig. 81.

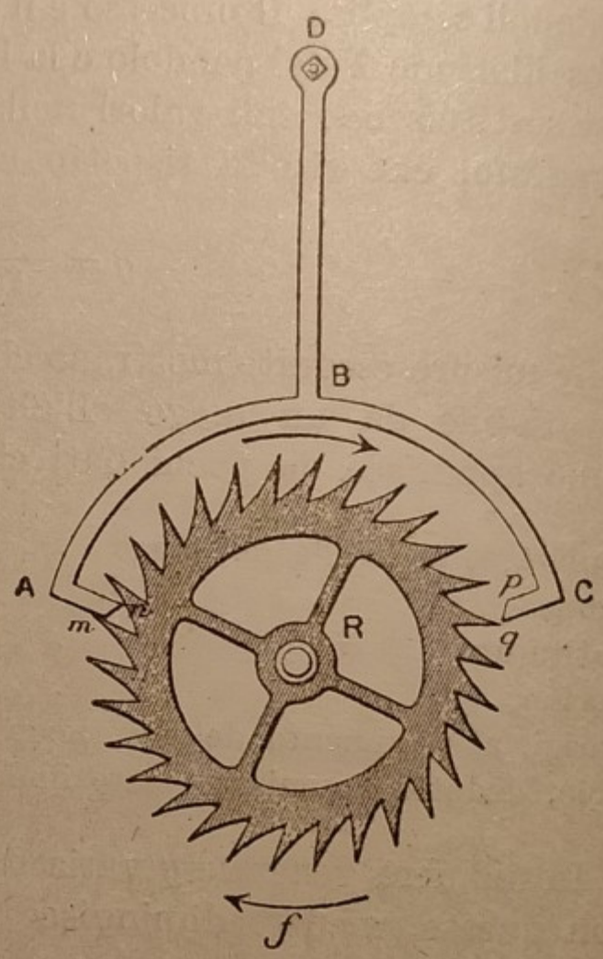


Fig. 82.

esso riceve un piccolo impulso ad ogni oscillazione semplice.

Lo *scappamento* è l'organo che lega il pendolo al rotismo ed il più usato è lo scappamento ad *àncora* immaginato da Huygens nel 1657.

L'ultima ruota *R* del rotismo (fig. 82) porta 30 denti ed è trascinata dal motore nel senso della freccia *f*. Fra i denti di essa vengono a impegnarsi alternativamente le estremità, dette *arpioni*, di un pezzo *ABC* chiamato *àncora*, mobile intorno a un asse *D*. L'asse di rotazione *D* è solidale con un pezzo *F*

(fig. 83) chiamata *forchetta*, tra le branche della quale è impegnata l'asta del pendolo M, di modo che l'ancora è mossa dal pendolo ed oscilla collo stesso periodo. In tal modo quando il pendolo si trova nella posizione estrema di sinistra o di destra uno degli arpioni dell'àncora, quello di destra o di sinistra, è impegnato contro i denti della ruota a scappamento e quindi il rotismo è in quegli istanti fermo. Quando però il pendolo scende verso la posizione di riposo, la ruota resta momentaneamente libera e compie una rotazione equivalente a $\frac{1}{60}$ di giro, perchè intanto il pendolo oltrepassa la posizione di riposo e l'àncora produce un successivo arresto. Sicchè con tale disposizione la ruota dello scappamento fa un giro in 60 scatti che si seguono ad intervalli equivalenti alla durata di una oscillazione semplice del pendolo. Se la lunghezza del pendolo è regolata in modo che tale durata sia eguale a 1 secondo, la ruota dello scappamento fa un giro in 1 minuto e una lancetta unita al suo asse conta i secondi.

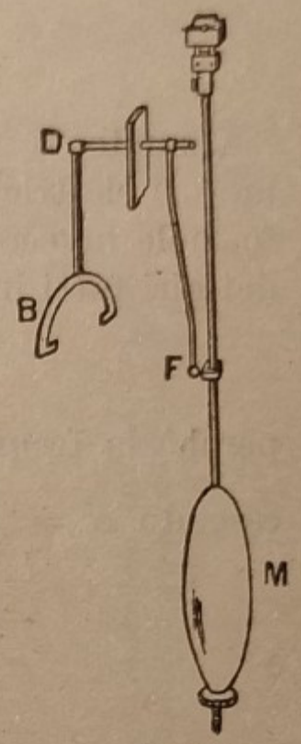


Fig. 83.

29. Moto circolare uniforme. - Forza centripeta e centrifuga. — Il *moto circolare uniforme*, è il moto di un punto che descrive una circonferenza percorrendo archi di lunghezza proporzionale ai tempi impiegati a descriverli.

Si chiama *velocità tangenziale* o *lineare*, la *lunghezza* dell'arco v percorso dal punto in un secondo; se T è il *periodo*, cioè la durata di un giro, e r il raggio della circonferenza, si ha evidentemente:

$$2\pi r = vT$$

ossia:

$$v = \frac{2\pi r}{T}. \qquad (1)$$

Si chiama invece *velocità angolare* l'*ampiezza* dell'arco de-

scritto dal mobile in un secondo. Tale velocità può essere espressa in gradi, e in tal caso, indicandola con n^o, si ha:

$$n^o = \frac{360^o}{T}; \qquad (2)$$

Quando si tratta di moti rotatori molto rapidi, turbine, motori elettrici, ecc. — è comodo far figurare nelle precedenti formole invece del periodo T, la frequenza N, ossia il numero dei giri fatti in un secondo. È evidente che

$$NT = 1,$$

perchè la frequenza e il periodo sono numeri inversi, quindi essendo $N = \frac{1}{T}$ le formole (1) e (2) acquistano la forma

$$v = 2\pi r N \qquad (1)'$$

e

$$n^o = 360^o\, N. \qquad (2)'$$

Or si consideri che se un corpo si muove sopra una curva non può essere soggetto ad una sola azione, la quale produce soltanto un moto rettilineo; in altre parole un moto curvilineo qualsiasi è sempre un moto risultante da almeno due moti rettilinei. Nel caso specifico del moto circolare uniforme si potrebbe dimostrare che il corpo è soggetto in ogni istante ad una velocità costante diretta secondo la tangente alla circonferenza, e ad una forza pure costante per intensità, ma diretta sempre verso il centro. La velocità indicata non è altro che la velocità tangenziale di cui è detto sopra, e la forza, che vien detta *forza centripeta* appunto perchè è costantemente diretta verso il centro, ha il solo compito di inflettere in modo continuo la traiettoria del mobile, senza di che questo obbedirebbe solo alla velocità tangenziale, e per inerzia si muoverebbe con moto uniforme secondo la tangente.

Per comprendere la natura della forza centripeta, scegliamo qualche esempio. Se si fa ruotare un corpo attaccato all'estremo di una funicella, unita per l'altro estremo alla mano, la forza centripeta è costituita dalla coesione delle diverse parti della funicella. Altrettanto avviene per la ruota di un volano nella

quale la forza centripeta è rappresentata dalla coesione fra le molecole della materia costituente i diversi raggi.

Nel caso della rotazione di un pianeta attorno al Sole, fa da forza centripeta l'attrazione a cui il pianeta è soggetto da parte del Sole.

Ma in tutti i casi avviene che contemporaneamente a tal forza per la legge dell'azione e reazione (23) si desta nel sistema ruotante un'altra forza *eguale e contraria*, che si chiama *forza centrifuga*.

Quando il corpo vien fatto ruotare attaccato alla funicella, di cui si è poco sopra parlato, la funicella si allunga qualche po', e nella sua tendenza a contrarsi esercita una trazione del corpo verso la mano — forza centripeta — e una trazione della mano verso il corpo — forza centrifuga. — Nel caso della rivoluzione di un pianeta attorno al Sole, l'attrazione è anche mutua, di guisa che la manifestazione di tal forza nel senso dal pianeta verso il Sole costituisce la forza centripeta, e la manifestazione della stessa forza nel senso che va dal Sole al pianeta, la forza centrifuga.

Si noti dunque che forza centripeta e forza centrifuga sono *coesistenti*, l'una non può sussistere senza l'altra, sicchè se si annulla la forza centripeta cessa ad un tempo anche l'altra, e il corpo obbedendo alla velocità posseduta si muove per inerzia lungo la tangente.

Ciò avviene, come è noto, nella fionda (figura 84), nella quale il corpo, dopo aver assunto una forte velocità di rotazione, sfugge rapidamente lungo la tangente, non appena, chi manovra l'apparecchio, lascia libero uno dei tratti della funicella che teneva il corpo avvinto alla mano. Il corpo sfugge dunque non per effetto della forza centrifuga, come talora si sente dire, ma per mancanza della forza centripeta.

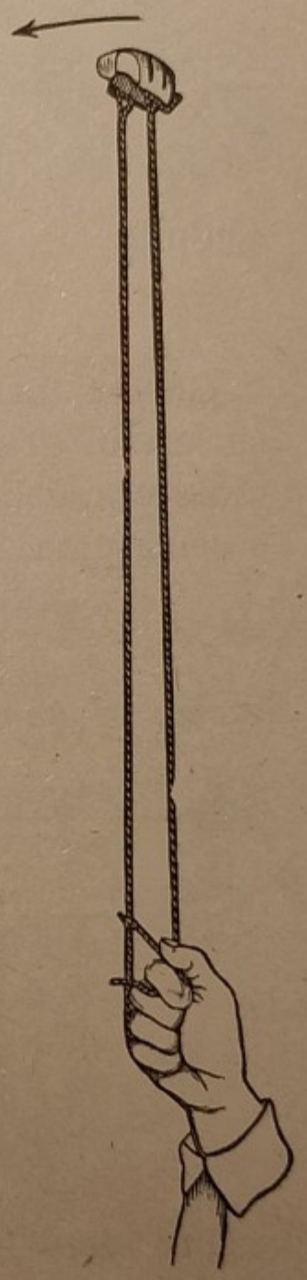


Fig. 84.

La Meccanica razionale dimostra che la forza centripeta F necessaria a mantenere una massa m in moto uniforme con velocità v su un cerchio di raggio r, è data dalla formola:

$$F = \frac{mv^2}{r} \; ; \qquad (1)$$

ed essendo nel moto uniforme (6)

$$v = \frac{s}{t} \, ,$$

nel nostro caso è

$$v = \frac{2\pi r}{T} \, .$$

Quindi:

$$F = \frac{4\pi^2 mr}{T^2} \, . \qquad (2)$$

Queste formole dànno la misura di F in dine se m è misurata in grammi-massa, r in centimetri e T in secondi.

Esse racchiudono le seguenti leggi della forza centrifuga o centripeta. A parità di altre grandezze la forza centrifuga

1° *è proporzionale alla massa ruotante.*

2° *è proporzionale al quadrato della velocità lineare, e anche, al quadrato della velocità angolare.*

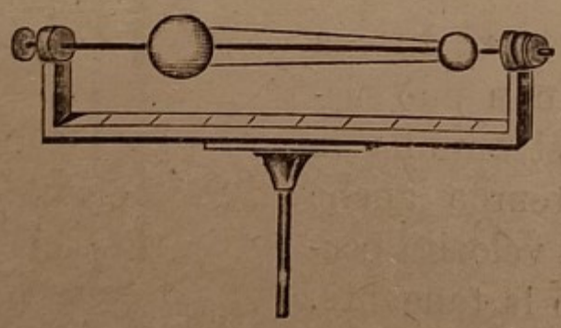


Fig. 85.

3° *è, a parità di massa e di periodo, direttamente proporzionale al raggio.*

4° *a parità di massa e di velocità è inversamente proporzionale al raggio.*

La 1ª e 3ª legge si possono verificare insieme coll'apparecchio della figura 85.

Due sfere hanno masse m ed m' che stanno fra loro in un certo rapporto, ad esempio, di 2 : 1. Tali sfere sono legate l'una coll'altra da due funicelle e possono scorrere lungo una verghetta metallica su cui sono infilate.

L'apparecchio viene montato sulla *macchina della forza centrifuga* (fig. 86), e le due sfere vengono in precedenza poste in tal posizione che durante la rotazione, le forze centrifughe

che su di loro si destano, sieno uguali e di senso contrario; se ciò si verifica, le due sfere durante la rotazione rimangono al loro posto. Per ottenere ciò applichiamo la (2).

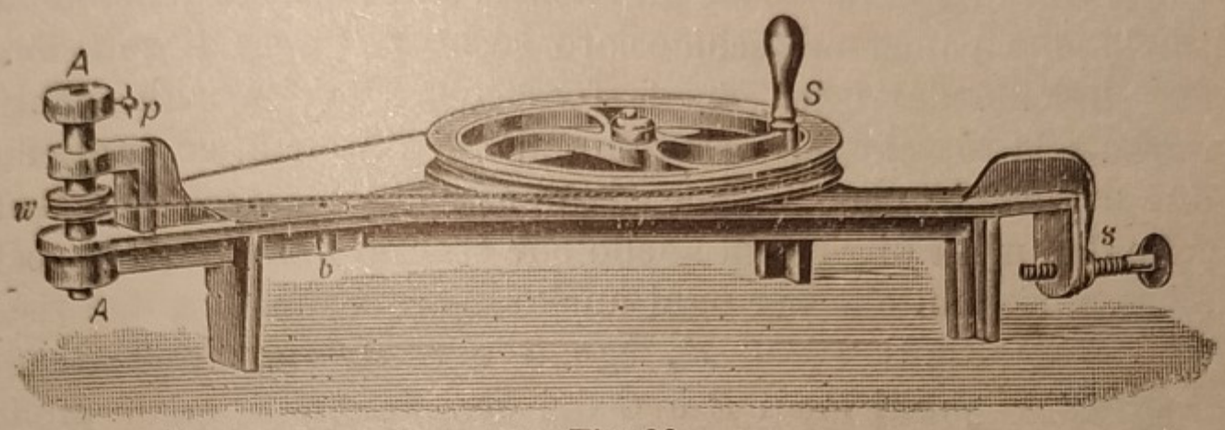


Fig. 86.

Per la prima sfera abbiamo:

$$F = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}\ ; \quad \text{e per la seconda:} \quad F' = \frac{4\pi^2 m'r'}{T^2}\ .$$

Da queste, poichè si vuole che sia $F = -F'$, si ottiene:

$$mr = -m'r'\ ;$$

cioè le due sfere vanno poste dalle parti opposte dell'asse di rotazione, in modo che in valore assoluto sia:

$$r : r' = m' : m\ .$$

Nel caso nostro, poichè è supposto che $m' : m = 1 : 2$, dovrà essere: $r' : r = 2 : 1$. L'esperienza prova esattamente quanto la teoria ha preveduto.

Coll' apparecchio detto degli *anelli di Newton* (figura 87), si può imitare lo schiacciamento polare dei pianeti. Due anelli $A_1 A_2$ formati con una lamina flessibile di acciaio, sono fissati l'uno all'altro ad angolo retto e fatti ruotare mediante

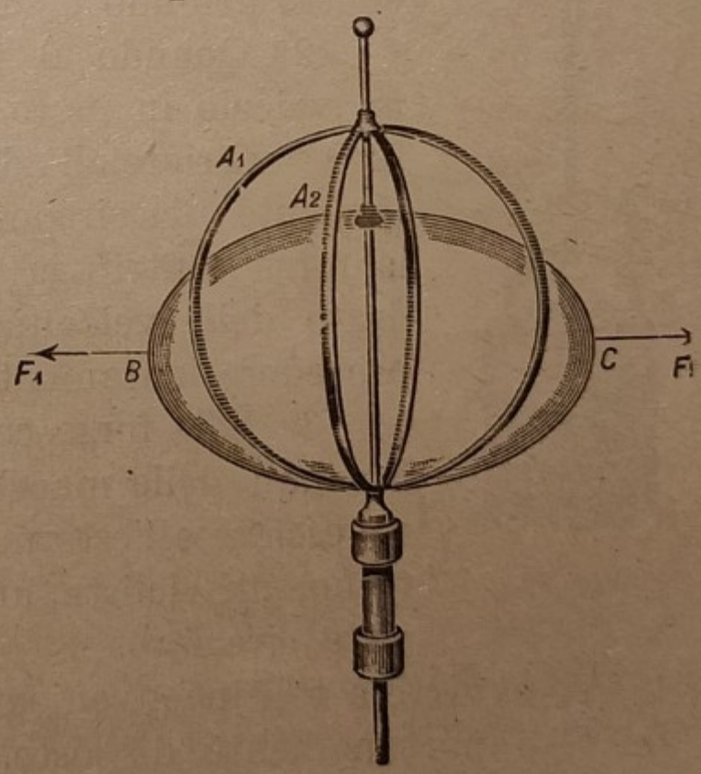


Fig. 87.

la macchina della forza centrifuga intorno al loro diametro verticale, formato di una sbarretta sulla quale può liberamente scorrere un cerchietto fissato agli anelli più grandi nella parte superiore. Durante la rotazione gli anelli si deformano e generano un solido di rivoluzione, schiacciato secondo l'asse di rotazione. Ciò dipende dal fatto che le forze centrifughe, sviluppantisi durante la rotazione sui singoli punti degli anelli, costituiscono due sistemi di forze parallele ed opposte, agenti rispettivamente sulle due metà di ciascun anello che stanno dalle parti opposte all'asse, sistemi che per ogni anello dànno luogo a due risultanti F_1 ed F_2 eguali e contrarie, applicate nei punti medi B e C dei semianelli, le quali producono evidentemente sulla lamina flessibile l'effetto descritto.

Fig. 88.

30. Effetti della forza centrifuga e applicazioni. — 1° Un secchio d'acqua, animato da rapido moto di rotazione in piano verticale, non lascia cadere il liquido nemmeno quando l'apertura è in basso, perchè la forza centrifuga che preme il liquido contro il fondo è superiore al suo peso (fig. 88).

2° Quando il fango aderente alle ruote di un veicolo in moto è soggetto a una forza centrifuga superiore all'adesione, si distacca secondo una tangente alla circonferenza del cerchione. E poichè la forza centrifuga aumenta in ragione del quadrato della velocità, è conveniente ai ciclisti di procedere lentamente sulle strade fangose.

3° È la forza centrifuga che tende a rompere i volani delle macchine, a dislocare le puleggie, a rovesciare all'esterno di una curva un veicolo, un treno, un ciclista, un cavallo al galoppo sopra una pista circolare.

Per ovviare a tali inconvenienti, per mezzo di masse metalliche, opportunamente disposte, si equilibrano le manovelle degli alberi delle macchine e delle ruote; si proteggono con scatole metalliche le spazzole circolari, le mole, le seghe circolari. Ciò per proteggere da gravi pericoli gli operai, che sareb-

bero altrimenti colpiti dai frammenti che tali apparecchi proiettano anche in via normale di funzionamento, e peggio dai frammenti dell'apparecchio se questo, per effetto della rapida rotazione, venisse a rompersi. Nei velodromi, nelle ferrovie, si fa più alta la parte esterna della curva; così il cavallerizzo che sta in piedi sul cavallo che corre in giro, si piega verso l'interno.

Riguardo alle applicazioni vere e proprie industriali della forza centrifuga accenniamo agli *idroestrattori* (fig. 89), apparecchi usati nelle grandi lavanderie per asciugare rapidamente i panni bagnati. Sono costituiti essenzialmente d'una specie di paniere fatto di rete metallica o di lamina bucherellata *ABCD*, reso solidale con un albero verticale *HK*, che riceve il suo moto da un motore che lo fa girare a circa 2000 giri al minuto. I panni vengono posti nel paniere, il quale è circondato da un recipiente esterno *MN* che raccoglie l'acqua cacciata dalla forza centrifuga e la fa effluire all'esterno mediante un robinetto di scarico *R*.

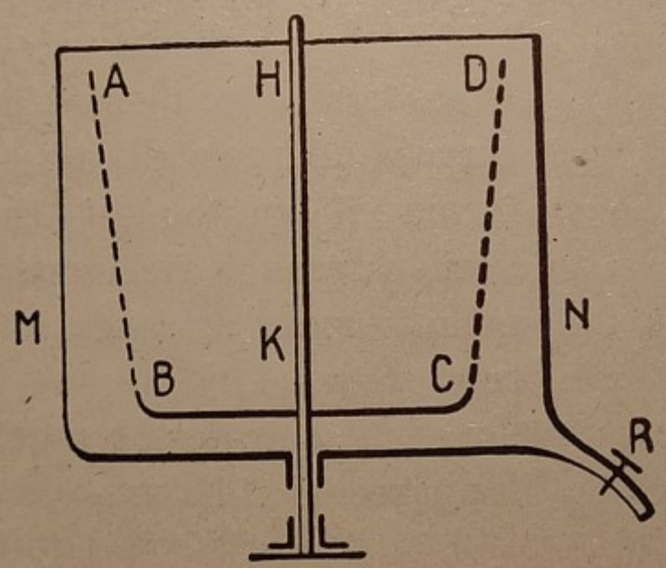


Fig. 89.

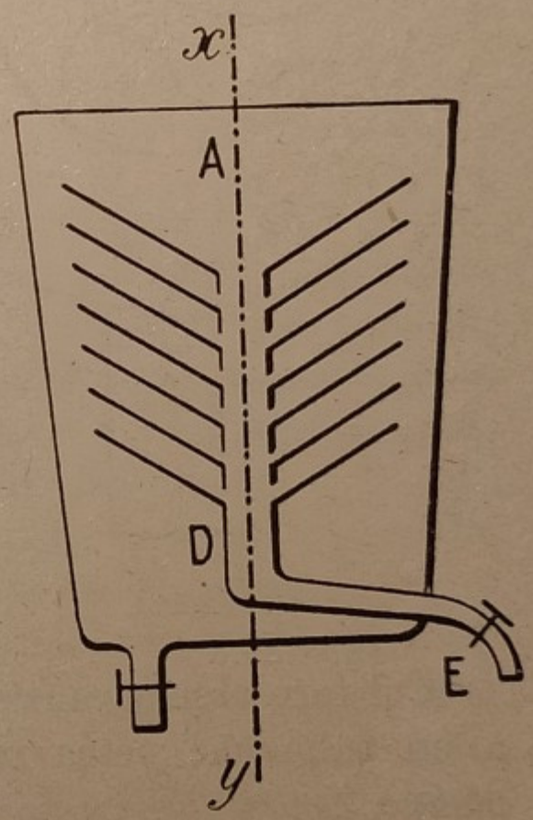


Fig. 90.

Nei caseifici la separazione della crema dal latte si eseguisce e con grande rapidità mediante le *scrematrici* centrifughe (fig. 90). Il latte vien messo in un recipiente *A* che porta fissa nell'interno una serie di imbuti sovrapposti, comunicanti verso il vertice con un tubo *D* che è coassiale coll'asse di rotazione *xy* dell'apparecchio. La crema avendo una densità 0,93, e il latte

scremato 1,036, la forza centrifuga agisce sulla prima con minor intensità, talchè il latte è proiettato fuori dagli imbuti, mentre la crema si raccoglie verso l'asse e cola per il tubo *DE*.

I *ventilatori* a forza centrifuga (fig. 91) sono formati di un mulinello ad alette diritte o curve *a*, *a*... girante rapidamente nell'interno di un tamburo *A*. Da questo parte un tubo tangente *B*, mentre un tubo *C* è unito al centro di una delle basi del tamburo. Così avviene che mentre il mulinello ruota l'aria partecipa alla rotazione, e per effetto della forza centrifuga viene spinta verso la periferia del tamburo e costretta ad uscire per il tubo tangente, mentre in corrispondenza dell'asse si forma il vuoto, per cui l'aria esterna è richiamata nella scatola attraverso il tubo *C*.

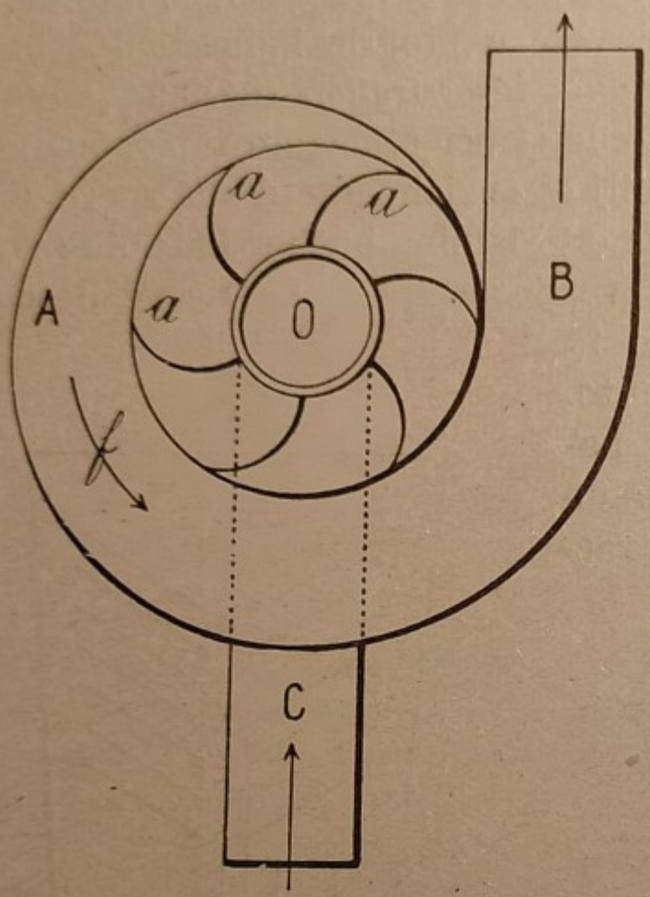


Fig. 91.

Se il foro assiale, anzichè comunicare coll'atmosfera è unito a un tubo che pesca nell'acqua, l'apparecchio diventa una *pompa centrifuga idraulica*.

Lavoro - Energia - Potenza.

31. Lavoro meccanico. — Eseguire un lavoro significa impiegare una forza per ottenere un effetto utile, perciò si richiede in ogni caso che il corpo o il sistema di corpi, cui la forza è applicata, risulti in movimento.

Un uomo lavora quando trasporta un carico; un cavallo lavora trascinando un carretto sopra una strada; un motore

elettrico applicato ad una pompa idraulica lavora mantenendo in moto la pompa per sollevare dell'acqua. In base a ciò, per *definizione*, diremo che *viene eseguito un lavoro tutte le volte che una forza accompagna un corpo nel suo movimento.*

Il caso più semplice che si presenta, al quale con opportune considerazioni si possono ridurre tutti gli altri, è che il corpo in moto sia accompagnato da una forza costante e che lo spostamento del punto di applicazione della forza si effettui nella direzione della forza. In tal caso ammettiamo che il lavoro eseguito L sia misurato dal prodotto della forza F per lo spostamento s, cioè:

$$L = F \times s. \qquad (1)$$

La misura del lavoro fatta con tale criterio è giustificata da semplici considerazioni. Un impresario deve far trasportare da manovali della calce, dei mattoni, ecc., per una casa in costruzione: è ovvio che la tariffa concordata tra impresa e operai contempli e la quantità — peso — del materiale che deve venire sollevato e l'altezza a cui deve essere portato. Dimodochè se in una costruzione un certo peso di materiale viene portato al secondo piano, i manovali riceveranno per il lavoro eseguito una somma che sarà evidentemente doppia di quella che percepirebbero se lo stesso materiale dovesse essere portato solo al primo piano, come pure la somma percepita dovrà essere doppia se un peso doppio di materiale verrà trasportato alla stessa altezza. Ciò avviene perchè appunto il lavoro eseguito si stima proporzionale al peso dei corpi che vengono sollevati, cioè alla forza che li accompagna nel loro movimento e all'altezza cui vengono portati, che è lo spostamento del punto di applicazione della forza.

Quasi sempre però la forza non conserva una intensità costante, e lo spostamento del corpo non si effettua nella direzione della forza e può anche essere curvilineo. Però tutti i casi con opportune considerazioni si riportano al caso tipico di una forza costante e di uno spostamento rettilineo nella direzione della forza stessa. Per esempio quando si solleva un corpo pesante o quando un corpo pesante scende secondo una

linea qualunque, il lavoro L eseguito è misurato dal prodotto del peso P del corpo per l'altezza h a cui è portato o da cui scende, cioè si ha sempre:

$$L = Ph. \qquad (2)$$

Per conseguenza il trasporto di un corpo pesante sopra un piano orizzontale si effettua teoricamente senza lavoro. In pratica però il trasporto esige un consumo di lavoro per vincere altre forze all'infuori della gravità, particolarmente l'attrito e la resistenza del mezzo, che è la resistenza che offre al moto di un corpo l'aria o l'acqua in cui esso si muove.

32. Lavoro motore e resistente. — Nella definizione di lavoro abbiamo ammesso che lo spostamento avvenisse nella direzione della forza senza precisarne il senso. Or nella pratica si riscontra che il più delle volte sul corpo agiscono più forze, che si possono ridurre a due, agenti nella direzione dello spostamento, ma in sensi opposti.

Ad esempio, quando mediante uno sforzo muscolare F solleviamo verticalmente un corpo pesante da G a G_1 (fig. 92), la forza muscolare F agisce nella direzione e nel senso del moto, e il peso del corpo P agisce nella direzione del moto, ma in senso opposto. La forza F si dice *forza motrice* o *potenza* e il peso P del corpo *forza resistente* o *resistenza*. Diremo allora che è la potenza che *eseguisce* il lavoro, o anche che la potenza *vince* la resistenza, e se s è lo spostamento del corpo, chiameremo il prodotto Fs lavoro *motore*, il prodotto Ps lavoro *resistente*.

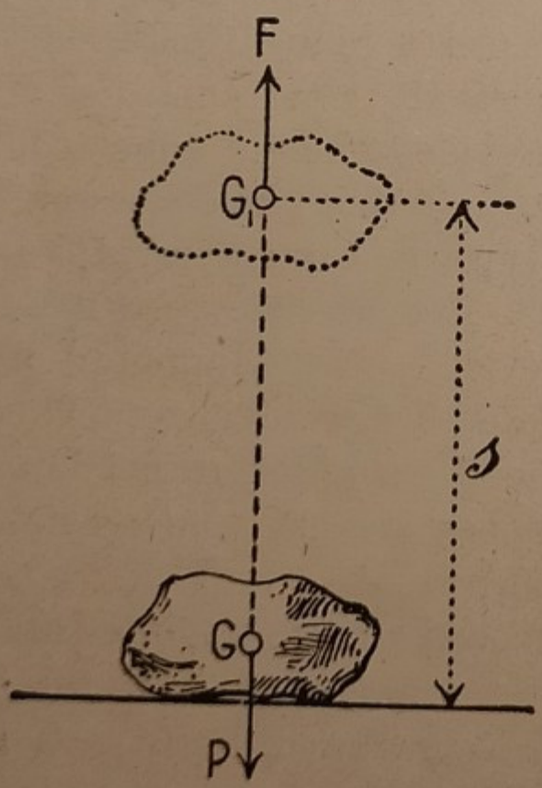


Fig. 92.

33. Unità di lavoro. — Dalla formola (1) del paragrafo 31 possiamo stabilire una *unità* per la misura del lavoro; basta fare in tal formola $F = 1$ e $s = 1$; essa diviene allora $L = 1$;

vale a dire il lavoro eseguito ha il valore *uno* se la forza che accompagna il corpo è *uno*, e lo spostamento nella sua direzione è *uno*. Cosicchè se per unità di forza prendiamo il *chilogrammo* e per unità di spostamento il *metro*, il lavoro *uno* è quello che *corrisponde ad una forza costante di un chilogrammo, mentre il suo punto di applicazione percorre, nella direzione della forza, lo spazio di un metro*. Tale unità di lavoro vien chiamata *chilogrammetro* (kgm).

Se invece si adotta come unità di forza la *dina* e di spazio il *centimetro*, l'unità di lavoro è detta *erg* o *ergon*.

Ricordando (22) che:

$$1 \text{ kg} = 980.000 \text{ dine circa}$$

e che:

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

1 kgm è il lavoro nel quale sono impegnate 980.000 dine per uno spostamento di 100 cm, quindi:

$$1 \text{ kgm} = 980.000 \times 100 = 98.000.000 \text{ di erg circa}$$

od anche:

$$1 \text{ kgm} = 9{,}8 \times 10^7 \text{ erg circa.}$$

Da queste considerazioni apparisce che l'erg è unità troppo piccola per le misure comuni, quindi nella pratica si adotta il *joule* che per *definizione* vale 10^7 erg. In tal maniera:

$$1 \text{ kgm} = 9{,}8 \text{ joule circa.}$$

34. Energia. — È *l'attitudine di un corpo a compiere un lavoro:* per conseguenza un corpo in movimento ha dell'energia; che si chiama *energia di moto*, e anche *energia cinetica*. Ma può avere dell'energia anche un corpo in quiete in grazia del suo *stato attuale*, con la qual denominazione intendiamo una posizione del corpo nello spazio, una certa forma, o infine un certo stato fisico o chimico. Dunque un corpo pesante portato sul tetto di una casa, ha dell'attitudine a compiere un lavoro che non aveva quando era sul piano della

strada; una molla in tensione ha pure una tale attitudine che non ha nella forma normale. Questi corpi hanno, come si dice, dell'*energia potenziale*.

Notisi che tanto energia cinetica quanto energia potenziale si possono avere anche nel caso in cui i corpi in questione hanno masse infinitesimali; così si ammette che il calore dei corpi sia una forma di energia cinetica dovuta al movimento di piccolissime particelle; è una forma di energia cinetica anche la corrente elettrica. Invece hanno dell'energia potenziale il sistema chimico carbonio-ossigeno, idrogeno-ossigeno, una carica di polvere pirica, una bottiglia di Leyda carica, un accumulatore carico, ecc.

Queste forme di energia possedute da masse infinitesimali — molecole, atomi, subatomi — si comprendono sotto il nome di *energia invisibile*.

L'energia cinetica è detta anche *forza viva* per il fatto che un corpo in moto è capace di compiere un lavoro, come fosse un corpo vivente, a spese della velocità posseduta.

Esempi di corpi in moto che eseguiscono un lavoro a spese della loro velocità, sono frequentissimi, anzi si può affermare che qualunque lavoro è prodotto da un corpo in movimento. Così un pendolo oscillando oltrepassa la posizione di riposo per inerzia e sale dalla parte opposta compiendo un lavoro per sollevare il proprio peso ad una certa altezza, ma lo compie a spese della sua velocità che va diminuendo; un proiettile che colpisce un ostacolo può penetrarvi ed eseguisce un lavoro nel vincere la coesione molecolare del corpo.

È dimostrato che un corpo in moto possiede un'energia cinetica E_c data dalla formola

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2.$$

E_c è il lavoro che il corpo è capace di eseguire passando dalla velocità v alla quiete, ed è misurato in erg quando le unità di misura di m e di v sono rispettivamente il grammo-massa e il centimetro al secondo.

A costituire l'energia cinetica di un corpo la massima importanza compete alla velocità, dimodochè i corpi che possiedono masse anche piccole, ma sono animati da grandi velo-

cità, possiedono una quantità rilevantissima di energia. Tali sono i proiettili lanciati dalle armi da fuoco con velocità che possono superare i mille metri al secondo; ciò spiega i grandi effetti distruttivi che producono.

Grandiosi effetti di distruzione sono anche prodotti dai moderni esplosivi, che pur essendo racchiusi in involucri di piccola resistenza, come le bombe, in grazia della enorme velocità da cui sono animate le molecole dei gas che si sviluppano in seguito alla violenta decomposizione dell'esplosivo, determinano nell'aria circostante uno spostamento così intenso da dar luogo ad effetti di distruzione straordinari.

Fra le innumerevoli applicazioni della forza viva posseduta da un corpo in moto, accenniamo l'uso del comune martello per piantar chiodi; in questo caso, al momento dell'urto, sulla testa del chiodo si esercita una forza di parecchie centinaia di chilogrammi. Nello stesso modo si spiega l'uso della *berta* o battipali, che serve per piantare nei terreni poco resistenti o paludosi, i pali per le palafitte.

Anche l'energia potenziale si può in certi casi calcolare con facilità; l'energia potenziale E_p posseduta da un corpo che pesa P^{kg} e si trova ad una altezza di h^m, viene misurata evidentemente dal lavoro che si è dovuto spendere per portare il corpo a tale altezza, ed è calcolabile quindi colla formola (2) del § 31, è cioè:

$$E_p = Ph^{kgm},$$

la quale è di grandissima importanza per la valutazione dell'energia dovuta alle cadute d'acqua, che vengono oggi largamente utilizzate.

35. Potenza. — La potenza di un motore è *il lavoro che il motore è capace di compiere nell'unità di tempo.* Quindi potremo prendere come unità di potenza la potenza capace di eseguire il lavoro di 1 kgm, di 1 erg o di 1 joule al secondo.

L'unità usuale è però il *cavallo-vapore* — HP da *Horse Power* = cavallo forza — che è la potenza capace di eseguire il lavoro di 75 chilogrammetri al secondo.

Essendo però l'*HP* una grandezza variabile, perchè varia

il kg. da cui esso dipende, i Fisici hanno convenuto di adottare come unità di potenza il *watt*, la potenza cioè capace di eseguire il lavoro di un joule al secondo.

Ricordando la relazione tra il kgm. e il joule, ritenendo $g = 980^{cm}$, si ha:

$$1\ HP = 75 \times 9{,}8 = 735 \text{ joule al secondo}$$

cioè:

$$1\ HP = 735 \text{ watt.}$$

Nella pratica si usano più frequentemente l'*ettowatt* e il *kilowatt*, che meglio si adattano alle comuni misure.

E perchè non avvengano equivoci, notisi che il *wattora*, frequentemente usato in Elettrotecnica, è unità di *lavoro* e non di potenza; è il lavoro che la potenza di 1 watt può eseguire in un'ora, ossia in 3600 secondi. E poichè per definizione 1 watt è la potenza capace di eseguire il lavoro di un joule al secondo,

$$1 \text{ wattora} = 3600 \text{ joule.}$$

L'*ettowattora* e il *kilowattora* sono multipli del wattora di significato ben chiaro.

36. Equilibrio dinamico nelle macchine. — In qualunque macchina operatrice agiscono contemporaneamente delle forze *motrici*, che tendono ad aumentare la velocità e delle forze *resistenti*, che tendono a diminuirla. Ora se si calcolano i rispettivi lavori, *motore* e *resistente* (32), eseguiti in un certo tempo t, si riscontra che la differenza dei due lavori è eguale alla variazione della forza viva subìta dal sistema in quel tempo.

Di guisa che se L_m e L_r indicano i lavori motore e resistente, e il sistema, considerato ridotto a un'unica massa m, ha al principio e alla fine del tempo considerato le velocità v_t e v_o rispettivamente, si ha:

$$L_m - L_r = \frac{mv_t^2}{2} - \frac{mv_o^2}{2}.$$

Per cui, se è $L_m > L_r$, è anche $v_t > v_o$, cioè la macchina assume un moto accelerato, e il contrario avviene se è $L_m < L_r$.

Se la macchina è in moto uniforme, o, come si dice anche, in *equilibrio dinamico*, essendo in tal caso $v_t = v_o$, dovrà essere anche $L_m = L_r$.

Ma il lavoro resistente è sempre la somma di due lavori: del lavoro *utile* e del lavoro *passivo* o *perduto*. Il primo è il lavoro ad eseguire il quale è destinata la macchina: ad esempio, in una pompa destinata a sollevare dell'acqua il lavoro utile è misurato dal prodotto del peso dell'acqua sollevata per l'altezza raggiunta. Il lavoro passivo è quello eseguito per vincere gli attriti e la resistenza del mezzo (37).

Considerate così le cose, quando la macchina è in equilibrio dinamico, si ha, indicando con L_u e L_p i lavori utile e perduto:

$$L_m = L_u + L_p.$$

La quale dimostra che il lavoro utile L_u è *sempre* minore del lavoro motore. Ciò porta all'assurdità del *moto perpetuo*, per realizzare il quale occorrerebbe che si verificasse invece il fatto contrario, cioè che fosse $L_u > L_m$.

Notiamo poi che il *rendimento* E di una macchina è il rapporto fra il lavoro utile e il lavoro motore; si ha cioè:

$$E = \frac{L_u}{L_m}.$$

37. Attrito e resistenza del mezzo. — Queste forze sempre presenti in una macchina, tendono a diminuirne la velocità e per vincerle occorre consumare inutilmente del lavoro motore.

Si dice *forza di attrito* o semplicemente *attrito* la forza resistente che un corpo trova sempre quando si muove a contatto di un altro. L'attrito *statico* è misurato dalla forza minima necessaria a iniziare lo spostamento relativo dei due corpi; l'attrito *dinamico* dalla forza necessaria per mantenere costante la velocità durante il moto; e l'esperienza prova che l'attrito statico, a parità di altre condizioni, è maggiore di quello dinamico, perciò lo sforzo richiesto nella messa in moto — sforzo di *smarramento* o di *avviamento* — è maggiore dell'attrito dinamico e lo supera di circa 2 quinti.

L'attrito si distingue in *radente*, che si ha quando i due corpi strisciano l'uno contro l'altro, come avviene, ad esempio,

nelle slitte, e *volvente*, quando la superficie del corpo in moto si sviluppa sull'altro, com'è delle ruote di un veicolo che rotolano sulla strada. A parità di condizioni l'attrito radente è sempre maggiore di quello volvente, ed è per questo che i veicoli a ruote sono quasi universalmente usati.

L'attrito cresce col crescere della pressione che un corpo esercita sull'altro ed è sensibilmente costante a tutte le velocità.

Si chiama *coefficiente d'attrito* il valore dell'attrito per un carico unitario. Il coefficiente di attrito sulle strade ordinarie è $^{35}/_{1000}$, ciò significa che per mantenere in moto uniforme sopra una strada ordinaria orizzontale un veicolo che pesa 1000 kg., si deve applicargli, in direzione orizzontale, una forza di 35 kg.

In molti casi pratici gli sforzi dei tecnici sono diretti a diminuire gli attriti, quindi l'uso delle strade ferrate, per le quali il coefficiente di attrito non arriva a $^{5}/_{1000}$; l'abbondante lubrificazione degli assi dei veicoli; l'uso dei *cuscinetti a sfere*, ecc.

In certi altri casi si utilizza l'attrito; così avviene nei freni, che sono blocchi, detti *ceppi*, di forma conveniente, che possono essere portati a strisciare con forza contro la periferia delle ruote, allo scopo di moderare o di arrestare la corsa del veicolo.

La *resistenza del mezzo* è la resistenza opposta al moto di un corpo dal fluido in cui si muove; tale fluido è comunemente l'aria.

La questione è diventata in questi ultimi tempi estremamente importante, avuto riguardo al moto dei proiettili e alla navigazione aerea, ma le leggi che regolano la resistenza del mezzo sono piuttosto complesse e le numerose determinazioni fatte non hanno dato sempre risultati molto concordanti.

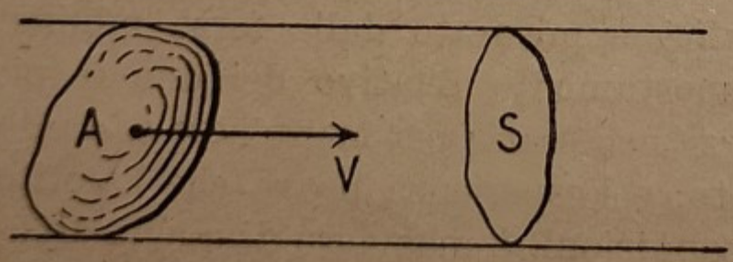


Fig. 93.

Si consideri un corpo A (fig. 93), animato da velocità V e sia S la sezione retta del cilindro, le cui generatrici son parallelle a V e tangenti al corpo. La resistenza dell'aria, che indicheremo con R, dipende:

1° *dalla densità del mezzo ed è proporzionale a tal densità;*
2° *dalla velocità V e cresce con questa;*
3° *dall'area di* S, *ed è sensibilmente proporzionale alla stessa;*
4° *dalla forma del corpo.*

Riguardo alla velocità si riscontra che per velocità molto piccole, dell'ordine di qualche centimetro al secondo, *la resistenza dell'aria è proporzionale alla velocità.* Ma per velocità un po' grandi, inferiori od eguali a 100 metri al secondo, R è sensibilmente *proporzionale al quadrato della velocità*, e per velocità superiori a 100 metri al secondo, e questo è il caso dei proiettili, R cresce *più rapidamente del quadrato della velocità.*

Avuto riguardo a tali leggi e specialmente alla velocità, si comprende che la caduta di un corpo nell'aria non può effettuarsi con moto uniformemente accelerato; dapprincipio il moto sarà accelerato, ma la resistenza dell'aria che cresce colla velocità di caduta, se il corpo cade da un'altezza sufficiente, ben presto viene ad eguagliare il peso del corpo; da quell'istante in poi il corpo si muove per inerzia con velocità costante.

Tale velocità è però variabile a seconda di diverse circostanze, e l'esperienza ha fatto scoprire diverse formole empiriche che si adattano ai diversi casi, ma di tali formole non possiamo trattare; diremo solo che la velocità costante v che può assumere cadendo nell'aria una sfera è data dalla formola:

$$v = 7{,}03\sqrt{rp}$$

nella quale v è la velocità in metri al secondo, r il raggio della sfera in metri, e p il peso in grammi di un centimetro cubo della sostanza di cui è formata.

La detta formola ci dà la ragione per cui certi corpi minutissimi, quali son quelli che formano il pulviscolo atmosferico e le piccolissime masse d'acqua costituenti la nebbia e le nubi, possono rimanere lunghissimo tempo in sospensione nell'aria, avendo in tali casi r valori estremamente piccoli.

A calcoli fatti le goccioline d'acqua formanti la nebbia e le nubi, aventi un diametro medio di $^2/_{100}$ di millimetro, scendono con una velocità limite di 30 millimetri circa al secondo.

38. Trasformazione e conservazione dell'energia. — L'energia possiede la preziosa qualità di trasformarsi da una specie all'altra. Nell'Universo ciò si verifica in modo continuo, ogni fenomeno consistendo in una trasformazione di energia.

Un corpo che cade da una certa altezza ha all'inizio del suo moto dell'energia potenziale, che durante la caduta diventa cinetica. Il corpo batte contro il suolo rimbalza e finisce col fermarsi.

Dov'è andata la sua energia? Come energia visibile è certamente sparita, ma in compenso si può riscontrare che il corpo e il piano, sul quale il corpo ha battuto, si sono riscaldati, vale a dire l'energia meccanica si è trasformata in una quantità equivalente di energia termica.

In altri casi si può riscontrare che l'energia termica può trasformarsi in energia meccanica, e con criteri analoghi che anche tutte le altre forme di energia sono trasformabili, in particolar modo l'energia elettrica, che sotto tale riguardo è la forma più adatta alle più svariate trasformazioni.

Or i Fisici, specialmente nel secolo XIX, hanno istituito delle importanti ricerche sull'argomento, ed eseguendo opportune misure, non hanno mai riscontrato che in qualche trasformazione la minima quantità di energia possa risultare distrutta o venire dal nulla.

L'energia non si crea, nè si distrugge; possono le diverse specie di energia passare da un corpo ad un altro, subendo le più svariate modificazioni — *qualunque fenomeno non è che una trasformazione di energia* —; può l'energia cinetica divenire potenziale, e questa alla sua volta ridiventare cinetica; l'energia visibile può diventare invisibile e reciprocamente; ma mai è possibile riscontrare una variazione anche minima nella *quantità* di energia messa in giuoco. Queste affermazioni costituiscono il grande *principio della conservazione dell'energia*, che insieme col noto *principio della conservazione della materia*, costituisce il più sicuro fondamento delle Scienze naturali.

Proprietà principali dei solidi.

39. Tenacità, durezza. — I solidi, corpi nei quali la coesione molecolare è assai grande, possono per azione di forze esterne essere deformati e anche divisi in parti. Nella tecnica interessa fra l'altro di conoscere il *limite di rottura* di una sostanza, cioè il minimo peso che agendo per trazione è sufficiente a rompere un filo avente la sezione di 1 mm^2. Il limite di rottura misura la così detta *tenacità* dei corpi. Ad esempio, si è trovato che il limite di rottura del ferro è di circa 33 chilogrammi, per l'acciaio può salire anche a 90.

La *durezza*, che non va confusa colla *tenacità*, è la resistenza opposta dai corpi alla scalfitura e può essere, come nel diamante, accompagnata dalla *fragilità*, per cui taluni corpi si frammentano sotto l'azione di piccole forze deformatrici.

Altre proprietà importanti sono la *duttilità* cioè la proprietà dei corpi di lasciarsi tirare in fili colla filiera; il più duttile dei metalli è il platino, col quale si sono potuti ottenere dei fili di pochi micron di diametro.

Si chiamano *malleabili* quei corpi che si lasciano ridurre col martello o col laminatoio in lamine. Così l'oro è dei metalli il più malleabile, essendosene ottenute delle foglie dello spessore di $\frac{1}{50}$ di micron.

Molti corpi infine, sotto l'azione di forze di piccola intensità ma di lunga durata, presentano delle forti deformazioni; un bastone di ceralacca, che è abbastanza fragile, si piega notevolmente se è tenuto per molto tempo poggiato sulle estremità. Dei pezzi di pece gettati alla rinfusa in una botte, finiscono per saldarsi insieme in un'unica massa, che presenta una superficie libera piana e orizzontale, come i liquidi, e se ci son dei fori nella botte la pece può colarvi a lentissime gocce.

Anche i metalli sottoposti a fortissime pressioni presentano un simile comportamento; ciò attesta la continuità fra lo stato solido e lo stato liquido. Anche la temperatura oltre la pressione ha nel fenomeno una grande importanza.

40. Elasticità. — Qualunque corpo, assoggettato a forze agenti su tutti i punti della sua superficie, subisce una diminuzione di volume e al cessare delle forze il corpo *tende* a riprendere il volume primitivo. Qualche corpo, come il caoutchouc, lo riprende esattamente; in altri rimane una diminuzione più o meno accentuata di volume. Questa tendenza del corpo a riprendere lo stato primitivo la attribuiamo ad una reazione delle molecole, che chiamiamo *elasticità*. Nel caso considerato abbiamo in particolare l'*elasticità di volume*.

I corpi solidi possono, poi, per effetto di forze esterne, cambiare di *forma*, e anche in questo caso al cessare delle forze si manifesta nei corpi una tendenza a riprendere la forma primitiva; abbiamo in questo caso l'*elasticità di forma*.

La deformazione di un corpo solido può avvenire in quattro maniere diverse: per *trazione*, per *compressione*, per *flessione*, per *torsione*.

In tutti i casi la deformazione è sensibilmente proporzionale alla forza deformatrice, e al cessare della forza il corpo riprende la forma primitiva, a meno che l'azione deformatrice non superi certi limiti, detti *limiti di elasticità*, oltre i quali il corpo rimane permanentemente alquanto deformato.

Meccanica dei liquidi.

41. Proprietà principali dei liquidi - Pressione. — I *fluidi* sono corpi le cui particelle, essendo dotate di piccola coesione, *si spostano facilmente le une rispetto alle altre*. Essi prendono la forma del vaso che li contiene, e sono corpi perfettamente elastici, cioè diminuiscono di volume quando si comprimono, ma riprendono il volume primitivo al cessare della pressione.

I fluidi si distinguono in *liquidi* e *gas* o *aeriformi*. I primi sono assai poco compressibili, e posti in un vaso sono limitati da una superficie libera. I gas sono al contrario assai compressibili, e occupano sempre tutto il volume del recipiente che li contiene.

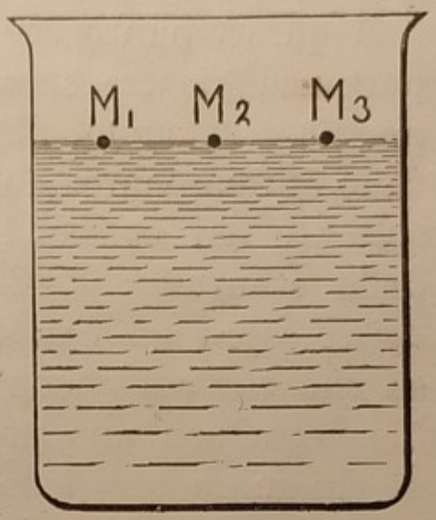


Fig. 94.

Un liquido invece posto in un recipiente vi si raccoglie sul fondo e se è in riposo ed è soggetto alla sola gravità, presenta una superficie libera *in ogni punto orizzontale*. Tale orizzontalità è conseguenza del peso del liquido e della scorrevolezza delle sue particelle; infatti sulla superficie libera non possono trovarsi particelle più alte e particelle più basse, se il liquido è in riposo; chè, se ciò fosse, le particelle più alte scorrerebbero nei punti più bassi. Così si comprende che tutte le particelle della superficie libera devono trovarsi alla stessa *altezza*, ossia

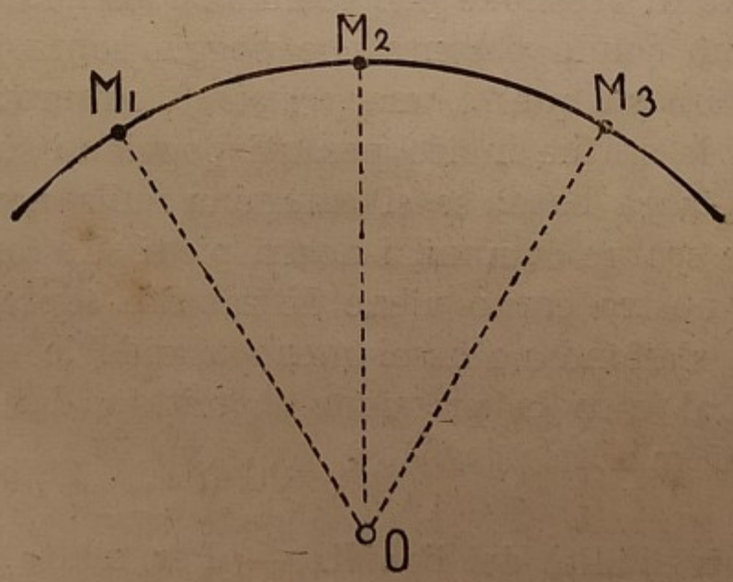


Fig. 95.

tutte egualmente distanti dal centro della Terra, vale a dire *la superficie libera di un liquido in riposo soggetto alla sola gravità deve essere in ogni punto orizzontale*. Quindi se il vaso ha dimensioni ordinarie, le diverse molecole M_1 M_2 M_3 della superficie libera devono essere sopra un piano orizzontale (fig. 94). Se

la superficie libera ha dimensioni assai grandi, come è il caso di un largo tratto di lago o di mare, le molecole superficiali M_1 M_2 M_3 si trovano sopra una calotta sferica (fig. 95).

A questo punto occorre precisare una grandezza, la cui importanza ricorre spesso nei fenomeni dei liquidi e dei gas, la *pressione*. Quando, ad esempio, si applica una forza sullo stantuffo di una pompa da bicicletta, l'effetto prodotto non dipende soltanto dal valore della forza, ma anche dall'area di base dello stantuffo; l'effetto dipende dal valore *della forza che agisce sopra un centimetro quadrato* della base. Ognuno infatti sa che ci vuol meno forza per gonfiare i pneumatici di una bicicletta con una pompa di piccola sezione. Si è convenuto di chiamare *pressione* il rapporto fra la forza premente F e l'area premuta S; indicandola con P, per definizione, abbiamo:

$$P = \frac{F}{S}.$$

L'unità di pressione potrà quindi essere il *chilogrammo*, il *grammo* o la *dina* per *centimetro quadrato*.

Il concetto di pressione può estendersi anche fuori del campo dei fluidi: un solido pesante che poggia sopra una superficie piana, esercita su questa una *pressione*, misurata nello stesso modo. Così le statue molto pesanti poggiano sul terreno mediante una larga base; se si cammina sulla neve non ghiacciata con le scarpe comuni, i nostri piedi si affondano, perchè il peso del nostro corpo viene distribuito sopra una base ristretta, ma s'affondano assai meno usando le racchette o gli sky, nel qual caso la pressione esercitata dal nostro corpo risulta assai minore.

42. Compressibilità dei liquidi. — Per molto tempo questi corpi vennero ritenuti come incompressibili; ciò dipese dal fatto che in realtà essendo pochissimo compressibili, sottoponendoli a pressione, la capacità del recipiente aumenta in misura così grande da mascherare la compressibilità.

Dopo numerosi tentativi infruttuosi iniziati dagli Accademici del Cimento nel secolo XVII, il Fisico danese Oersted nel 1820 fece conoscere un apparecchio che chiamò *piezometro* col quale

si può indubbiamente provare e anche misurare, se occorre, la comprimibilità dei liquidi.

Un modello di piezometro, che non è veramente della forma di quello originario di Oersted, è rappresentato nella figura 96. Esso è formato di una bolla di vetro *A* contenente il liquido da esaminare, chiusa dentro a un recipiente più grande *B* pieno d'acqua e comunicante con il cannello sottile *G*. La bolla *A* comunica anche con un cannello *C* che ha la stessa sezione del cannello *G*. Unendo il cannello *C* con una pompa ad aria (65) si esercita una pressione sul liquido della bolla e si osserva che il liquido scende nel cannello. Ma pel contemporaneo aumento di capacità del recipiente *A*, una certa quantità di acqua del recipiente *B* viene sollevata nel cannello *G*; però l'abbassamento in *C* è maggiore dell'innalzamento in *G*. Ciò prova che il liquido di *A* ha veramente subìto una diminuzione di volume, misurata dalla differenza degli spostamenti nei due cannelli. Il liquido riprende nel cannello *C* esattamente la posizione di prima al cessare della pressione, dimostrandosi perfettamente elastico.

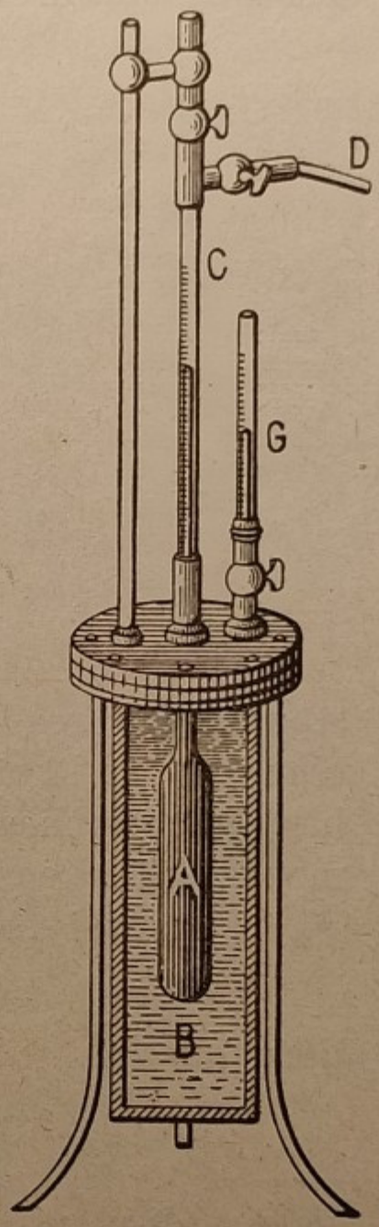


Fig. 96.

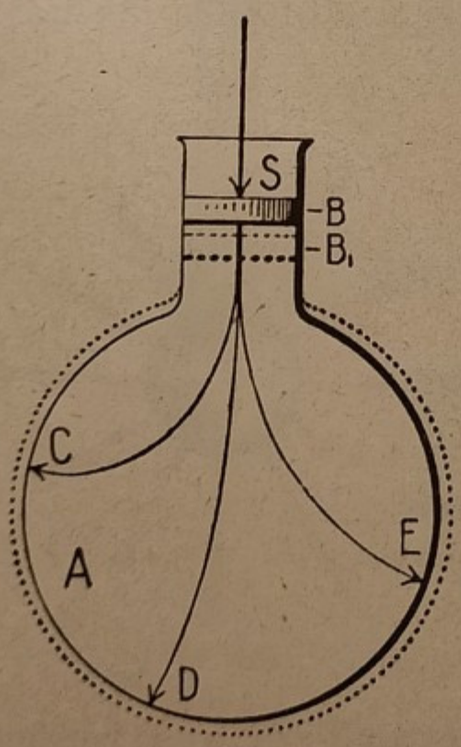


Fig. 97.

43. Trasmissione della pressione nei liquidi.—Prendiamo un liquido chiuso in un vaso *A* munito di un tubo cilindrico nel quale è impegnato uno stantuffo *S* (fig. 97). Esercitando su questo una forza lo si vedrà scendere da *B* a B_1, e ciò

avviene non tanto per la diminuzione di volume del liquido che è insignificante, quanto per l'aumento di capacità del recipiente, perchè la pressione esercitata sullo stantuffo si fa sentire su tutti i punti *CDE* delle pareti del vaso, in modo che ciascun centimetro quadrato di esse viene premuto da una stessa forza diretta verso l'esterno, normale alla superficie.

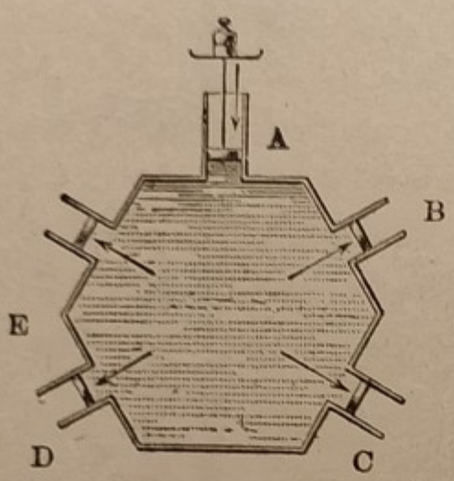


Fig. 98.

Il principio secondo il quale il liquido trasmette la pressione esercitatavi direttamente mediante lo stantuffo, è detto *Principio di Pascal* e viene così enunciato:

Se si esercita una pressione sopra una regione del liquido, essa si trasmette egualmente in tutte le direzioni.

Se, dunque, in un recipiente H si trovano delle aperture A, B, C... (fig. 98) munite di stantuffi di area S_1, S_2, S_3... e si esercita una forza F_1 sul primo, bisognerà applicare sugli altri per mantenerli in equilibrio delle forze F_2, F_3... tali che

$$F_1 : F_2 : F_3 ... = S_1 : S_2 : S_3 : ...$$

ossia che:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} = \frac{F_3}{S_3} = ... ;$$

vale a dire per l'equilibrio è necessario che *il rapporto fra la forza premente e l'area premuta rimanga costante*, cioè che la *pressione* sia eguale in tutti i punti delle pareti.

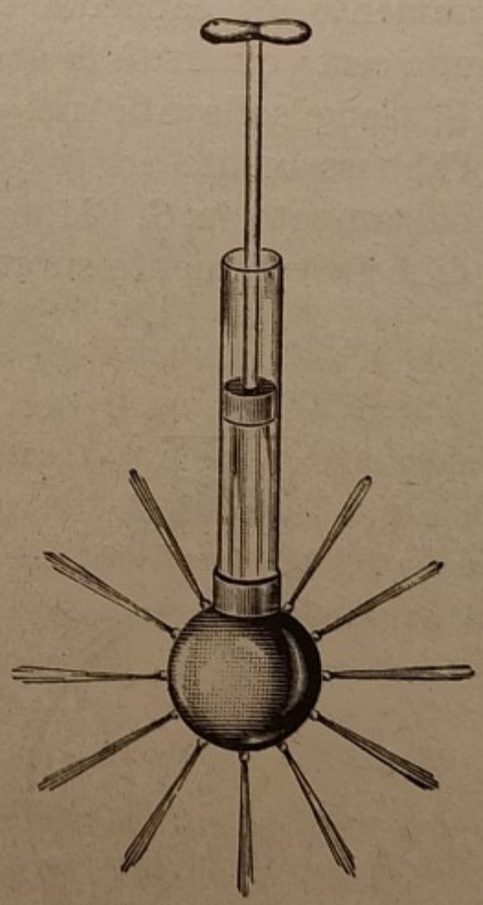


Fig. 99.

Il principio del Pascal non è suscettibile di una verifica sperimentale rigorosa per l'intervento di diversi elementi, quali l'attrito degli stantuffi, il peso di questi, e il peso del liquido, che concorrono a modificare il risultato finale. Tuttavia la

verità di questa legge è provata dalle conseguenze che se ne deducono e che sono in armonia coi fatti.

Una dimostrazione di indole scolastica si può eseguire con l'apparecchio rappresentato dalla figura 99. Esso consiste in una boccia metallica provvista di piccoli orifizi in diversi punti e unita ad un tubo cilindrico soprastante, nel quale è impegnato uno stantuffo a tenuta d'acqua. Immergiamo l'apparecchio nell'acqua sì da riempirnelo totalmente, e poi, toltolo fuori, spingiamo subito fortemente lo stantuffo; allora si vede l'acqua zampillare dai vari orifizi, e la direzione di ciascun zampillo essere normale alla superficie del recipiente.

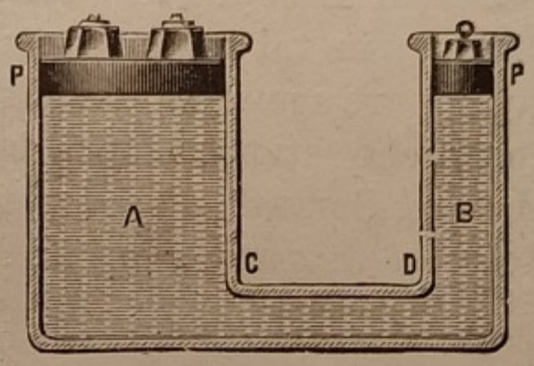


Fig. 100.

44. Torchio idraulico. — Numerose sono le applicazioni del principio di Pascal; fra tutte ci limiteremo a dire del *torchio idraulico*.

È una macchina che ridotta alla minima espressione è formata di due tubi cilindrici AB pieni di un liquido, muniti di stantuffi scorrevoli a perfetta tenuta, di sezioni S ed s molto

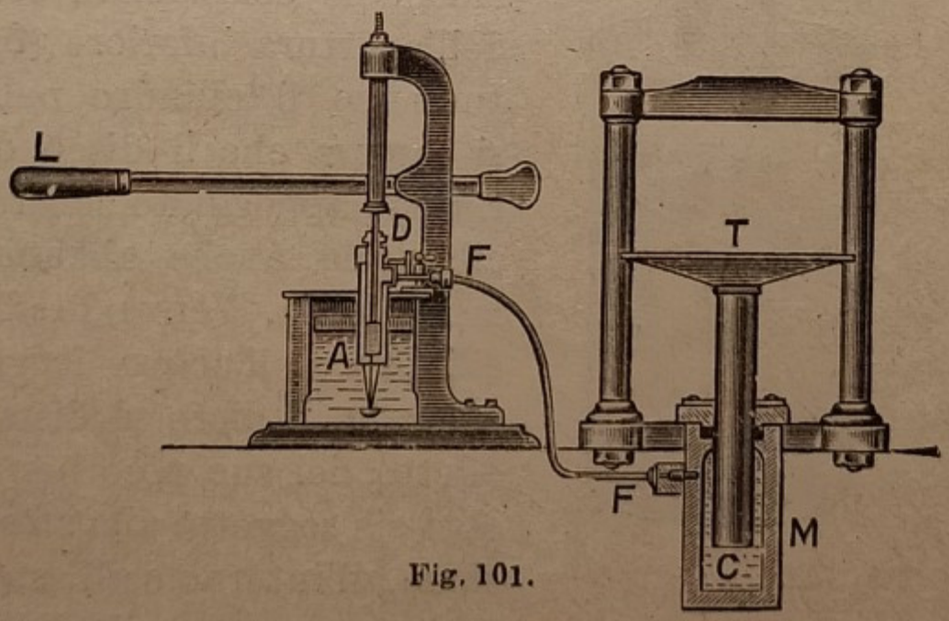


Fig. 101.

diverse, riuniti mediante un tubo di comunicazione (fig. 100). Se gli stantuffi sono in equilibrio la pressione p del liquido è la stessa dappertutto, e quindi si ha che le forze ps e pS che

agiscono sugli stantuffi sono diverse; dimodochè se $S = 50\ s$, con una forza limitata ps si può equilibrare la forza $pS = 50\ ps$.

Il torchio idraulico (fig. 101) è una macchina di grande importanza, essa è la più potente macchina costruita per sollevare pesi o per esercitare delle grandissime pressioni.

In pratica è formata di una pompa A (69) che attinge l'acqua dal serbatoio sottostante e pel tubo F la inietta nel cilindro M, entro il quale scorre uno stantuffo C che porta la piattaforma T. Fra questa e un piano fisso superiore, tenuto fisso da colonne, si collocano i corpi da premere. La potenza agisce in L sopra lo stantuffo D mediante un lungo braccio di leva; in tal modo con una limitata potenza, quale si può sviluppare agendo a mano sulla leva, la pressione esercitata sui corpi che stanno sopra la piattaforma T può risultare assai elevata. Con tale disposizione si possono agevolmente sollevare dei pesi di parecchie tonnellate.

45. Pressioni dal basso in alto. — Per verificare l'esistenza di queste pressioni si ricorre a un tubo di vetro, aperto alle due estremità, entro il quale si fa passare un filo che sostiene un sottile disco di vetro smerigliato facendolo combaciare con l'orlo dell'apertura inferiore (fig. 102). Immerso il cilindro nell'acqua, si osserva che il disco di vetro rimane appoggiato contro il tubo cilindrico anche abbandonando la funicella. Versando allora nel cilindro dell'acqua leggermente colorata, il disco si distacca per effetto del suo peso non appena esso sia soggetto alla stessa pressione all'interno e all'esterno; ciò arriva quando il livello del liquido è lo stesso fuori e dentro il cilindro.

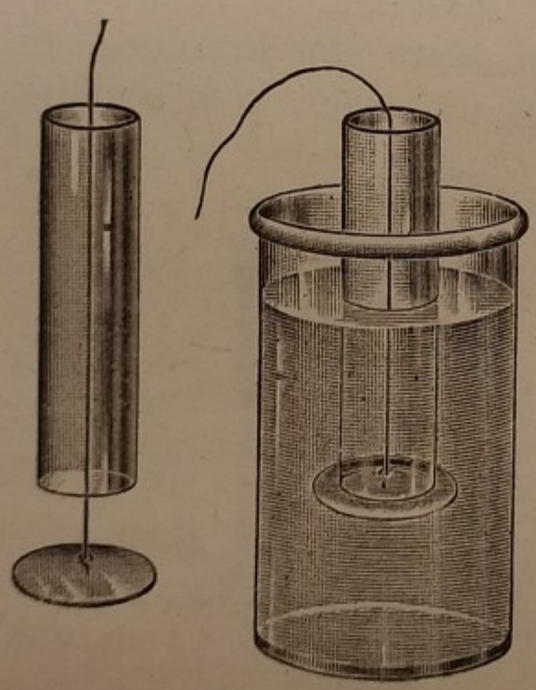


Fig. 102.

46. Pressione idrostatica sul fondo e sulle pareti di un vaso. — Un liquido esercita delle pressioni sul *fondo* e sulle *pareti* del

recipiente. Se il fondo è piano e orizzontale ed ha un'area di S^{cm^2}, la forza che vi preme è $F = Shp$ grammi, dove h è l'altezza in centimetri, del liquido, e p il peso in grammi di 1 cm^3 del liquido stesso. La grandezza p è detta comunemente *peso specifico* o anche *densità* del liquido. La forza F è indipendente dalla forma del vaso. Lo si verifica con l'apparecchio rappresentato dalla fig. 103. BC è un tubo di ferro che termina a sinistra con una ghiera di ferro filettata e a destra con un tubo di vetro $K'B'$; tale tubo contiene del mercurio. Fanno parte dell'apparecchio tre recipienti 1, 2, 3, di forma diversa, aperti in basso e portanti una ghiera filettata, sì da poterli avvi-

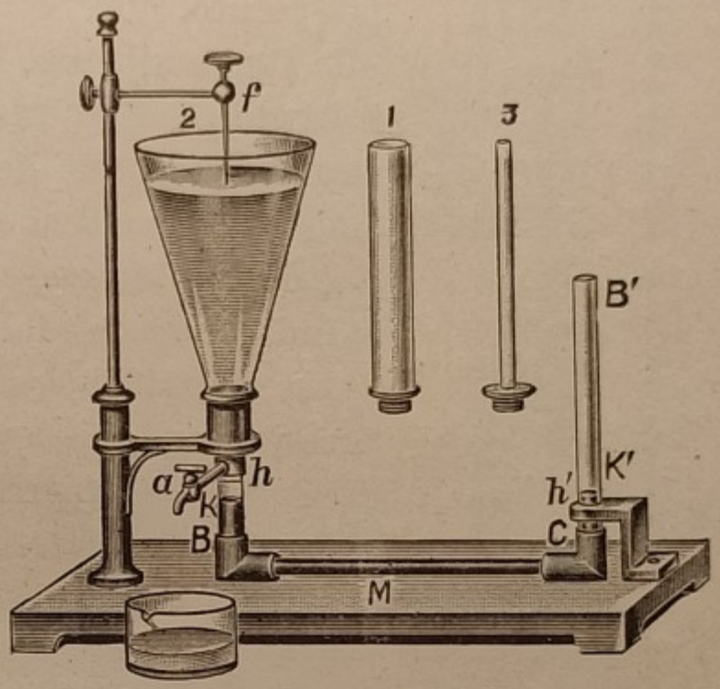


Fig. 103.

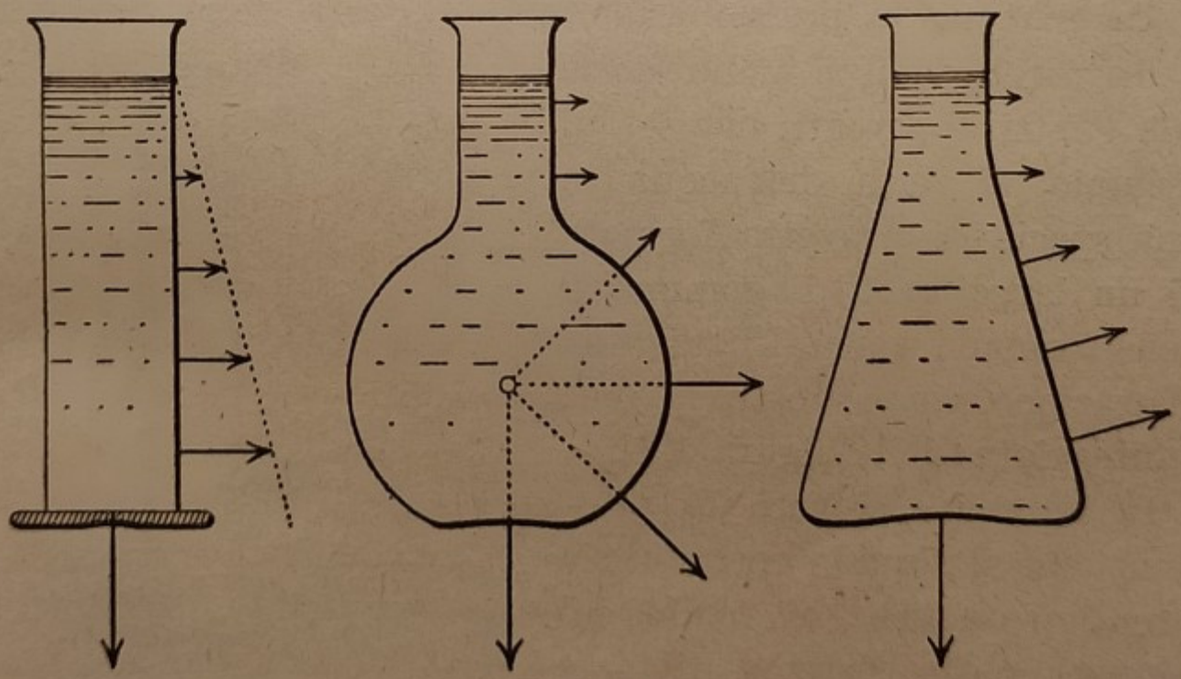


Fig. 104.

tare sulla ghiera fissa. Messo a posto uno qualunque dei tre recipienti, vi si versa dell'acqua fino ad una certa altezza, precisata

dall'indice f e si nota, facendo uso di un anellino scorrevole sopra il tubo di vetro $K'B'$, l'altezza che vi acquista il mercurio. Si vedrà che questa altezza è sempre la stessa qualunque sia il recipiente adoperato, purchè in ogni caso l'acqua arrivi alla stessa altezza. In ognuna di queste prove il fondo piano e orizzontale è costituito dalla superficie libera del mercurio nel ramo di sinistra, per cui si conclude che la pressione che un liquido esercita sopra il fondo del vaso è indipendente dalla forma del vaso stesso.

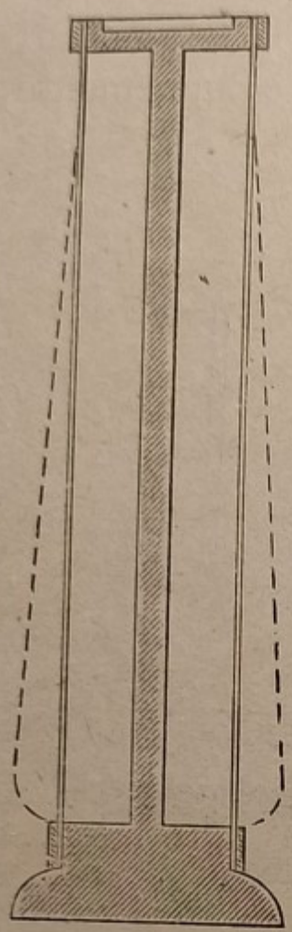


Fig. 105.

Le *pareti laterali* sopportano pure delle pressioni trasmessevi per effetto del principio di Pascal; e la pressione è in ciascun punto *normale* alla parete.

La figura 104 illustra la distribuzione delle pressioni sulle pareti di alcuni vasi, per i quali la varia lunghezza delle freccie indica i valori rispettivi delle diverse pressioni, che, come si sa, aumentano colla profondità.

In generale le pressioni laterali, in causa della resistenza delle pareti, non si manifestano con effetti apparenti; ma se, ad esempio, si versa dell'acqua in una specie di provetta formata di un largo tubo di gomma, si vede formarsi verso il basso una dilatazione, come mostra la linea punteggiata della figura 105.

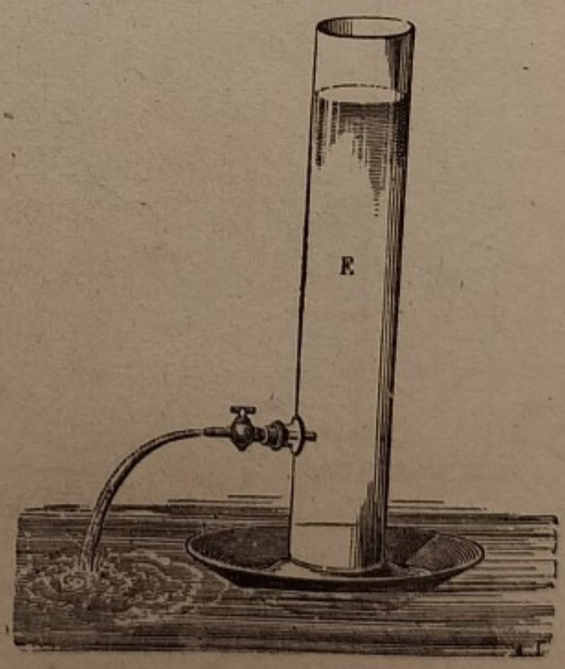


Fig. 106.

In tutti i casi però le pressioni che il liquido esercita sia lateralmente sia sul fondo costituiscono un sistema di forze equilibrato *orizzontalmente*; con ciò intendiamo che le componenti orizzontali di tutte le pressioni costituiscono un sistema

equilibrato, mentre le componenti verticali hanno per risultante una forza diretta verso il basso che è il peso del liquido. Perciò, se si rende il vaso libero di muoversi orizzontalmente, come si può fare sospendendolo a una funicella a mo' di un piombino, o mettendolo a galleggiare sull'acqua (fig. 106), il filo resta verticale nel primo caso e nell'altro il galleggiante rimane fermo sulla superficie dell'acqua. Ma se aprendo un robinetto, si fa uscire un getto di liquido, si annulla la pressione che agiva sull'elemento di parete che aprendo il robinetto è stato soppresso, e la pressione rimanente sull'elemento di parete opposto al robinetto, obbliga il galleggiante a muoversi decisamente dalla sua parte. Si ha così il *galleggiante a reazione*.

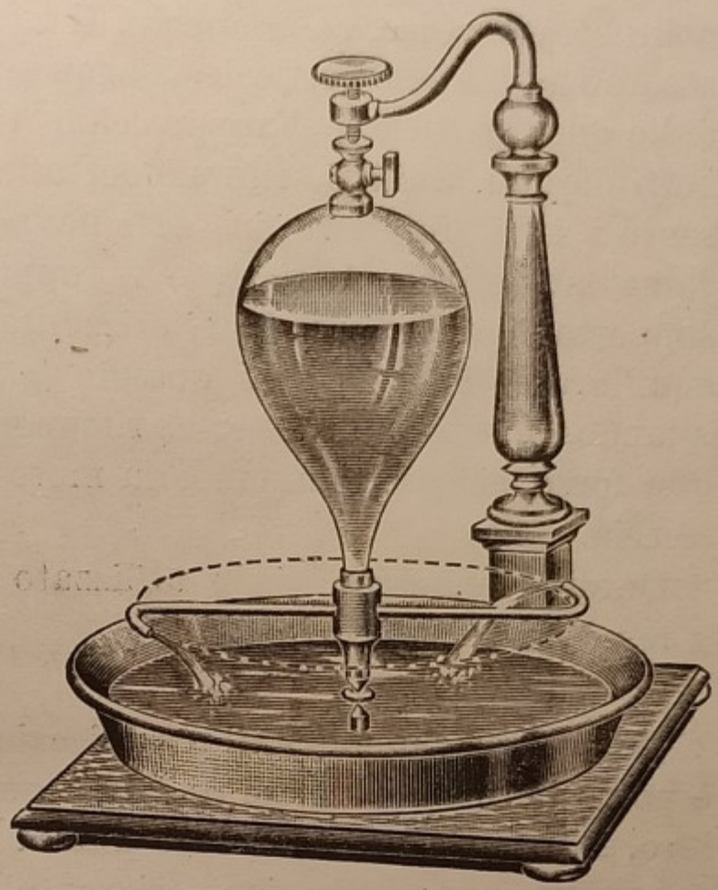


Fig. 107.

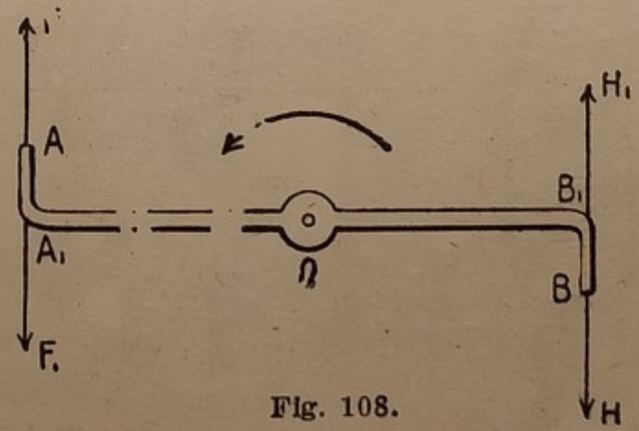


Fig. 108.

Lo stesso fenomeno si verifica nell'*arganetto idraulico* (fig. 107). È un vaso a forma di pera, portante in basso due tubi diame-

tralmente opposti, le cui estremità, ricurve orizzontalmente nello stesso verso, sono aperte. Il vaso pieno d'acqua è mobile attorno ad un asse verticale. L'acqua esce contemporaneamente dalle due aperture e l'apparecchio ruota in *senso inverso* ai getti liquidi. Infatti, riferendoci alla figura 108 che rappresenta i tubi inferiori in sezione perpendicolare all'asse di rotazione, gli elementi A_1 e B_1 opposti alle aperture A e B sopportano delle pressioni orizzontali F_1 e H_1 che sono equilibrate dalle F e H quando le aperture son chiuse, ma quando queste sono aperte rimangono attive solo le prime due forze che determinano un moto rotatorio nel senso della freccia.

Questo fenomeno viene utilizzato in grande nelle *turbine a reazione.*

47. — Vasi comunicanti e applicazioni. — Quando un liquido è posto in due o più vasi di forma qualunque, comunicanti fra loro, il sistema forma un *vaso unico*; perciò le *superficie libere* sono sopra uno stesso piano orizzontale. Ciò è sperimentalmente provato coll'apparecchio della figura 109, formato di un grande recipiente V che comunica in basso con un tubo orizzontale, munito di robinetto R, alla estremità del quale può unirsi uno

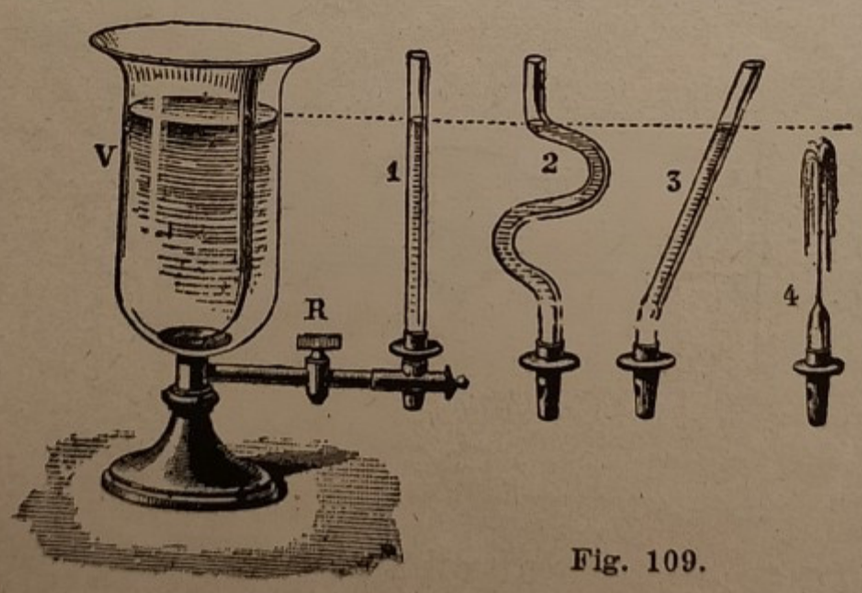


Fig. 109.

qualunque dei tubi 1, 2, 3. In ogni caso si riscontra che l'acqua arriva alla stessa altezza nel vaso V e nel tubo comunicante con esso. La stessa verifica si può eseguire più semplicemente

con due tubi qualunque riuniti alla loro parte inferiore mediante un tubo di gomma. Un liquido che vi si versi prende lo stesso livello nei due tubi qualunque sia la loro posizione relativa e il loro diametro.

I mari e gli oceani costituiscono degli immensi vasi comunicanti; perciò, in essi si trovano alla stessa altezza tutti i punti della superficie libera, che è presso a poco sferica. Il livello del mare si prende come punto di partenza per la misura delle altezze alla superficie del globo. Notisi che i mari interni possono avere altezza diversa dagli oceani; così il Mar Nero, in causa della grande quantità d'acqua apportatavi dai grandi fiumi che vi sboccano, ha un'altezza qualche po' superiore al Mediterraneo, dimodochè verso di questo si manifesta una rapida corrente attraverso lo Stretto dei Dardanelli.

I *getti d'acqua* trovano pure la loro spiegazione nel principio dei vasi comunicanti. Se nell'apparecchio della figura 109 al tubo 1 si sostituisce il tubo 4, troppo corto perchè il liquido possa, aperto il robinetto, elevarsi alla stessa altezza di *V*, il liquido esce formando uno zampillo verticale. La resistenza

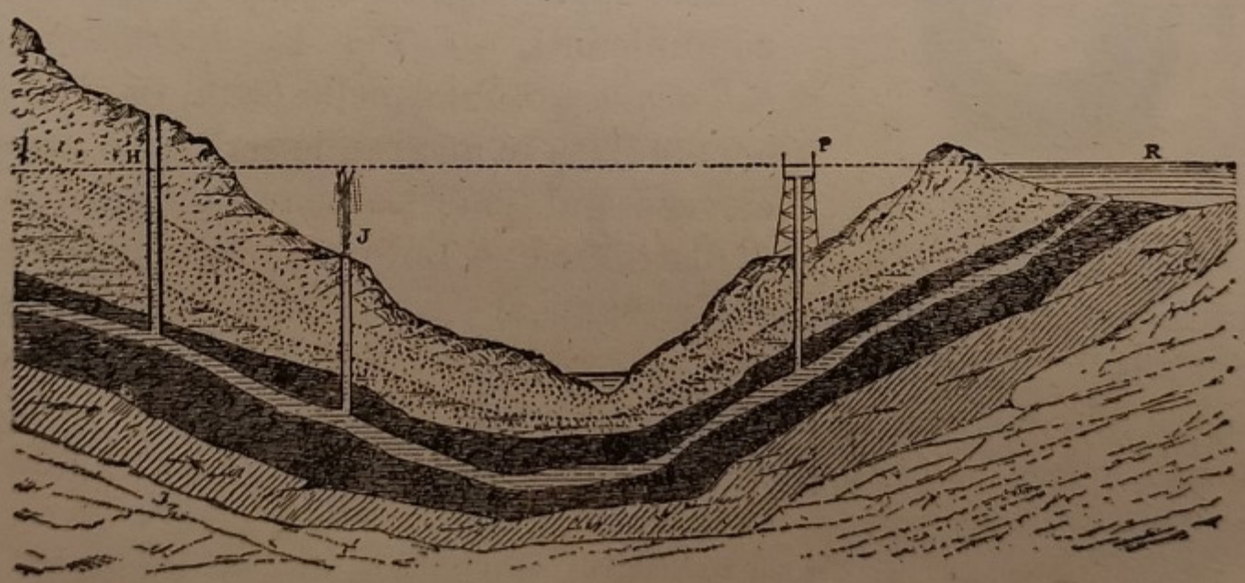


Fig. 110.

dell'aria e l'urto delle gocce che ricadono diminuiscono l'altezza a cui il liquido s'innalza.

I *pozzi artesiani* funzionano anche col principio dei vasi comunicanti.

Sia R (fig. 110) un serbatoio d'acqua, che può essere un lago, un nevaio, ecc. Può avvenire che esista nell'interno del terreno una comunicazione, per mezzo di canali tra tale serbatoio e uno strato sabbioso e quindi permeabile all'acqua compreso fra due strati di terreno impermeabile. Se in tali condizioni si perfora il terreno piantandovi dei tubi H, J, P che arrivino alla falda acquifera, avviene che l'acqua può effluire zampillando.

Se invece in due vasi comunicanti si pongono due liquidi *non miscibili*, il liquido di densità maggiore occupa il tubo di comunicazione e *le altezze dei due liquidi al disopra del piano orizzontale, che comprende la superficie di separazione, sono in ragione inversa delle densità, ossia dei pesi in grammi di un centimetro cubo dei liquidi.* Ciò si prova versando nel tubo ad U della figura 111 prima del mercurio e poi, sopra il mercurio, da una sola parte, dell'acqua.

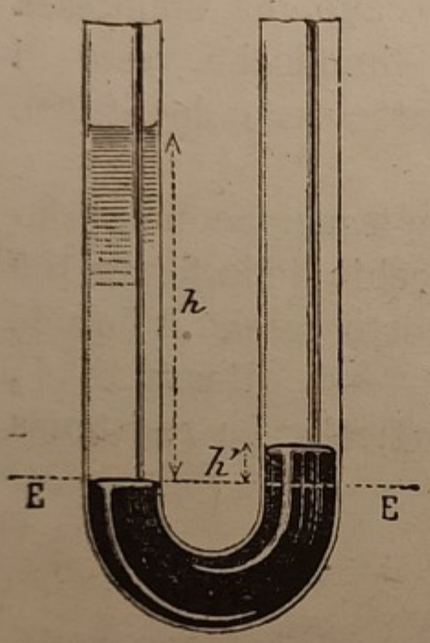


Fig. 111.

48. Applicazioni del principio dei vasi comunicanti. — Per la *distribuzione dell'acqua* potabile nelle città, l'acqua è accumulata in un grande serbatoio assai elevato, dal quale partono i grandi tubi di distribuzione. Le diramazioni di questi tubi, munite di robinetti, arrivano ai diversi piani delle case, dimodochè, quando si apre un robinetto, l'acqua esce perchè tende ad elevarsi al livello del serbatoio. La velocità di efflusso cresce col crescere della differenza di livello fra il robinetto e il serbatoio.

La *livella ad acqua* è un tubo metallico, le estremità del quale sono piegate in su e terminano con due tubi di vetro A, A' (fig. 112). Il tubo è sorretto da un treppiede S. Il piano orizzontale che passa per la superficie libera dell'acqua colorata versata nei due vasi comunicanti, serve da piano di riferimento.

Con tale apparecchio si può facilmente misurare la diffe-

renza di livello fra due punti A, B presi sul terreno (fig. 113).

La livelletta viene collocata in una posizione intermedia; in A viene fissato un regolo verticale diviso, lungo il quale

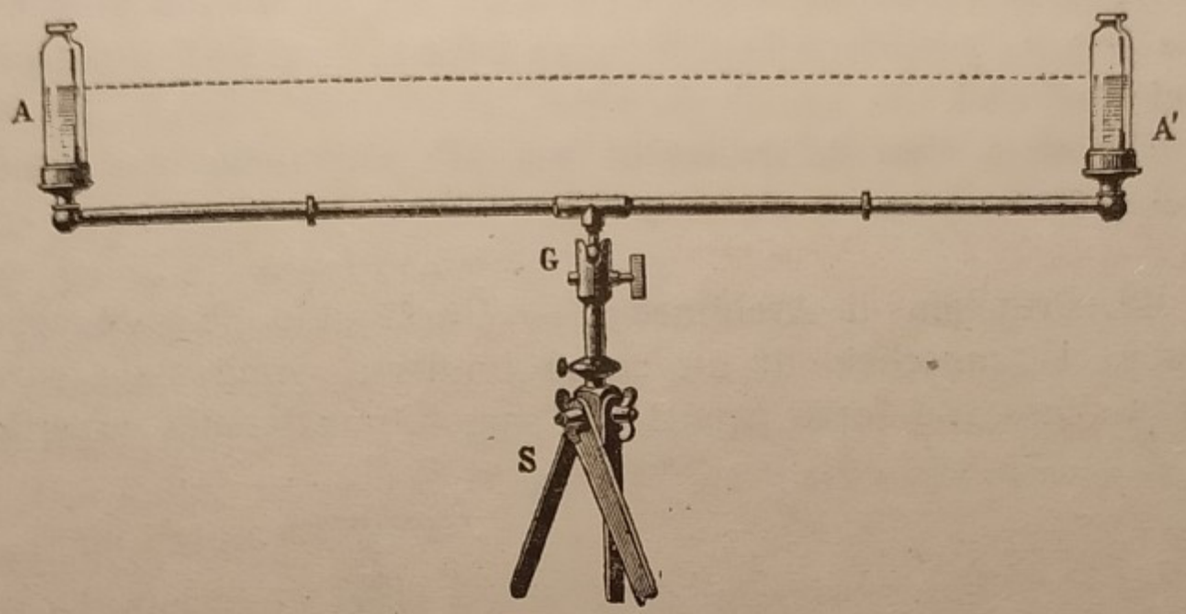


Fig. 112.

è scorrevole una tavoletta detta *biffa* e l'operatore mette l'occhio in n' e dirige il raggio visuale secondo la linea $n'n$ che sfiora le superfici libere dell'acqua nei due tubi di vetro;

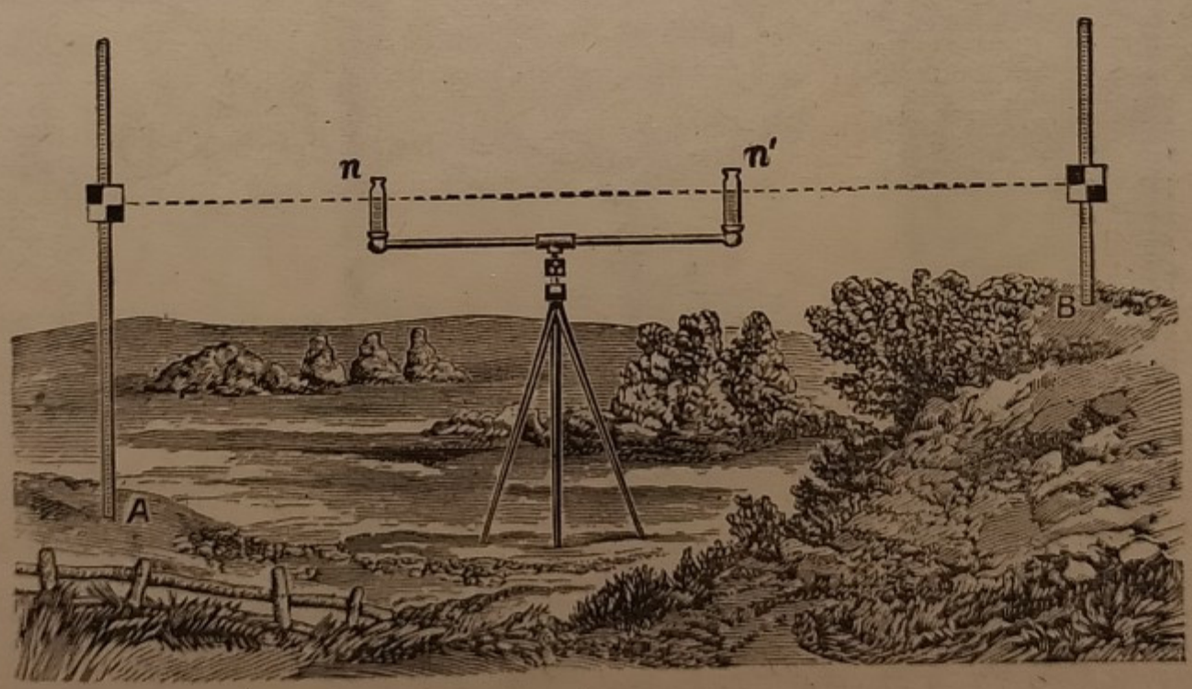


Fig. 313.

il *raggio visuale è allora orizzontale.* Un assistente sposta lentamente la biffa, finchè sarà avvisato dall'operatore che il centro di essa coincida col raggio visuale, e legge l'altezza

del centro della biffa dal punto A. L'assistente trasporta poi il regolo in B, l'occhio viene posto in n e si mira secondo nn'; anche in questo caso il centro della biffa vien fatto coincidere col raggio visuale e si legge l'altezza del centro dal punto B. La misura cercata è la differenza delle altezze lette sul regolo nei due casi.

Un altro tipo di livello di uso più universale è descritto nel § 55.

49. Principio di Archimede. — Un liquido pesante agisce sopra la superficie di un corpo immerso come sulle pareti d'un vaso. Le forze agenti sui singoli punti della superficie

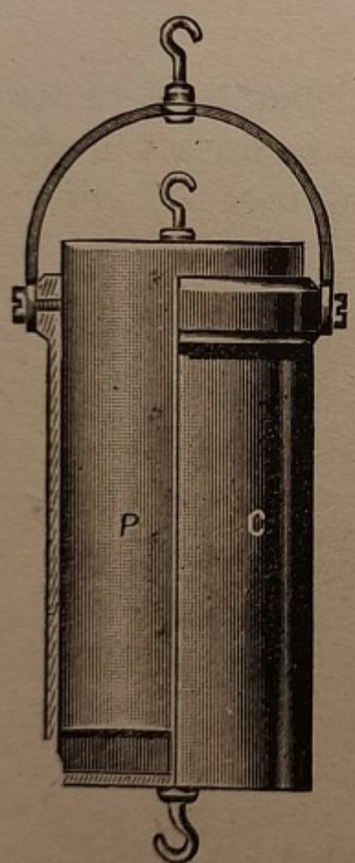


Fig. 114.

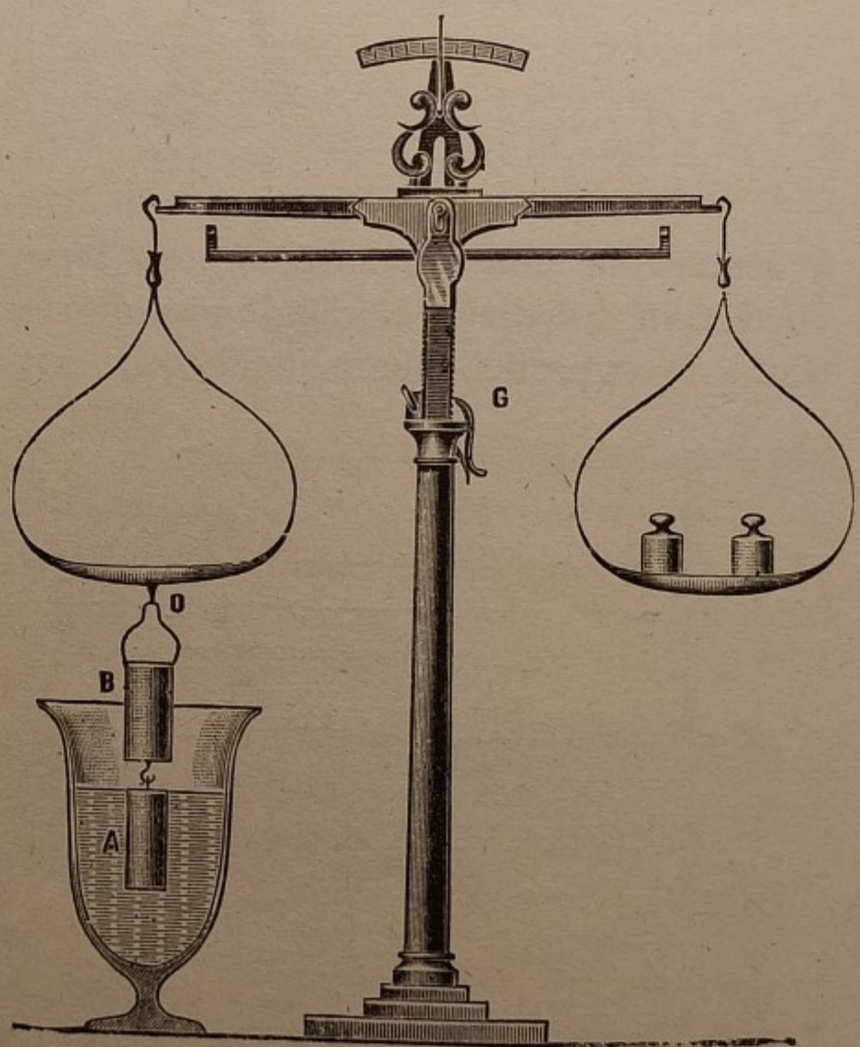


Fig. 115.

otale del corpo immerso hanno una risultante verticale detta *spinta, diretta verticalmente dal basso in alto, eguale al peso del liquido spostato e applicata nel centro di gravità di quest'ultimo.* Tale punto di applicazione vien detto *centro di spinta.*

Per dimostrare questo celebre principio, dovuto ad Archimede di Siracusa, pensiamo a una superficie ideale, che, come un velo, isoli una porzione di liquido contenuto in un recipiente. Dappoichè il liquido contenuto non discende malgrado il suo peso, ciò prova che l'insieme delle pressioni subìte da parte del liquido circostante, eguaglia il suo peso: naturalmente questa risultante delle pressioni conserverà lo stesso valore se, al posto del liquido, si sostituisce un corpo limitato dalla medesima superficie.

Il principio d'Archimede è suscettibile d'una dimostrazione sperimentale. Si usa a tale scopo il *doppio cilindro* di Archimede (fig. 114); esso è formato di due cilindri metallici, l'uno cavo C e l'altro massiccio P che può occupare esattamente la cavità del primo.

Ad uno dei piatti della *bilancia idrostatica*, che la figura 115 illustra, senza bisogno di particolari spiegazioni, si sospende il cilindro cavo B e sotto questo il cilindro massiccio A. Si fa l'equilibrio caricando dei pesi o anche semplicemente della tara sull'altro piatto. Si fa allora pescare il cilindro massiccio in un bicchiere pieno d'acqua, con che esso riceve una spinta dal basso in alto; l'equilibrio è rotto, ma viene ristabilito se si riempie d'acqua il cilindro cavo. La spinta è dunque eguale al peso dell'acqua che riempie il cilindro vuoto, ossia dell'acqua spostata dal cilindro massiccio.

50. Equilibrio dei galleggianti. — Un corpo totalmente immerso è dunque soggetto a due forze: 1° il suo peso P, applicato dall'alto in basso al suo centro di gravità; 2° la spinta S eguale al peso del liquido spostato, agente dal basso in alto nel centro di spinta.

La forza che tende a far cadere il corpo nel liquido è la differenza $P - S$. Questa differenza fra il peso del corpo e la spinta è detta *peso apparente*.

Per $P > S$ il corpo cade, com'è il caso del ferro nell'acqua, ma la sua caduta, data la forte resistenza offerta dal liquido, è meno rapida che nell'aria.

Per $P < S$ il corpo sale verso la superficie — sughero nel-

l'acqua, ferro nel mercurio. — Quando emerge dall'acqua, la spinta diminuisce, e arriva il momento in cui essa *diventa eguale al peso che rimane costante.* Da quel momento il corpo cessa di salire, esso *galleggia* e rimane in equilibrio sotto l'azione di due forze eguali ed opposte.

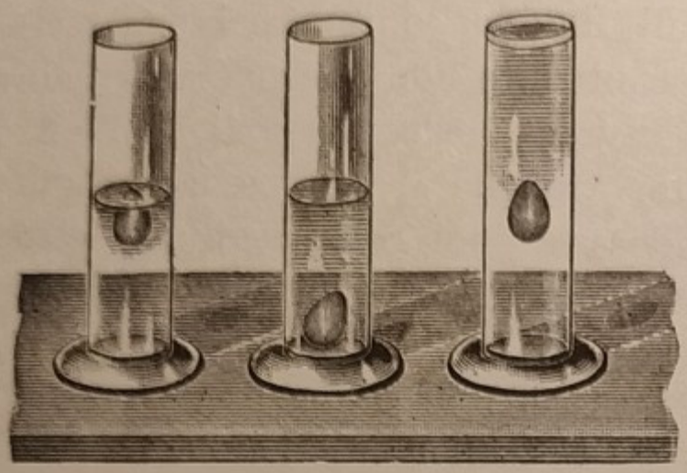


Fig. 116.

Per $P = S$ il corpo resta sommerso senza salire nè scendere. Si possono realizzare i tre casi con un uovo fresco esso cade al fondo nell'acqua pura, perchè

Fig. 117.

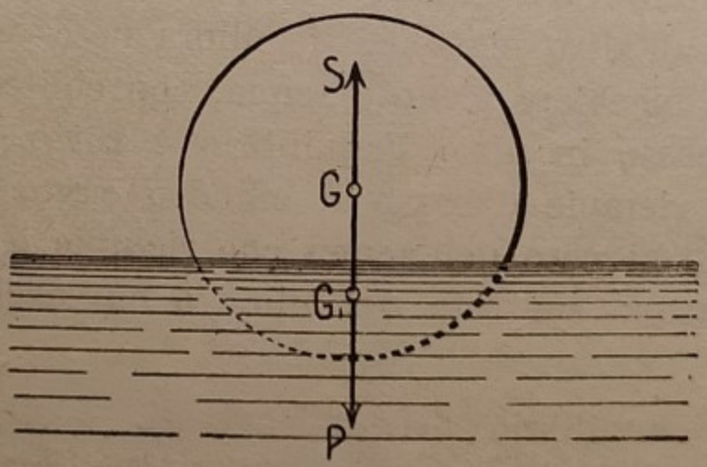


Fig. 118.

la sua densità media supera quella dell'acqua; in acqua satura di sal di cucina galleggia; in un miscuglio conveniente di acqua pura e acqua salata resta sospeso nel liquido (fig. 116).

Le tre condizioni si possono realizzare anche col *diavolino di Cartesio* o *ludione* (fig. 117). È formato di una figurina cava di smalto, alla quale si dà spesso la forma di un diavolino, avente un piccolo foro in basso. Nell'interno si trova qualche po' di acqua e sopra questa dell'aria; in tali condizioni esso galleggia sopra l'acqua contenuta in una provetta. Ma se si preme la membrana che è legata all'apertura della provetta,

la pressione si trasmette per tutto il liquido, l'acqua penetra nella figurina, ne aumenta il peso e la fa scendere. Cessando di premere la membrana, la figurina ripassa in senso inverso per le condizioni precedenti, perchè l'aria che è stata compressa nella prima operazione, espandendosi, spinge fuori l'acqua e il corpo, diminuito di peso, risale verso la superficie.

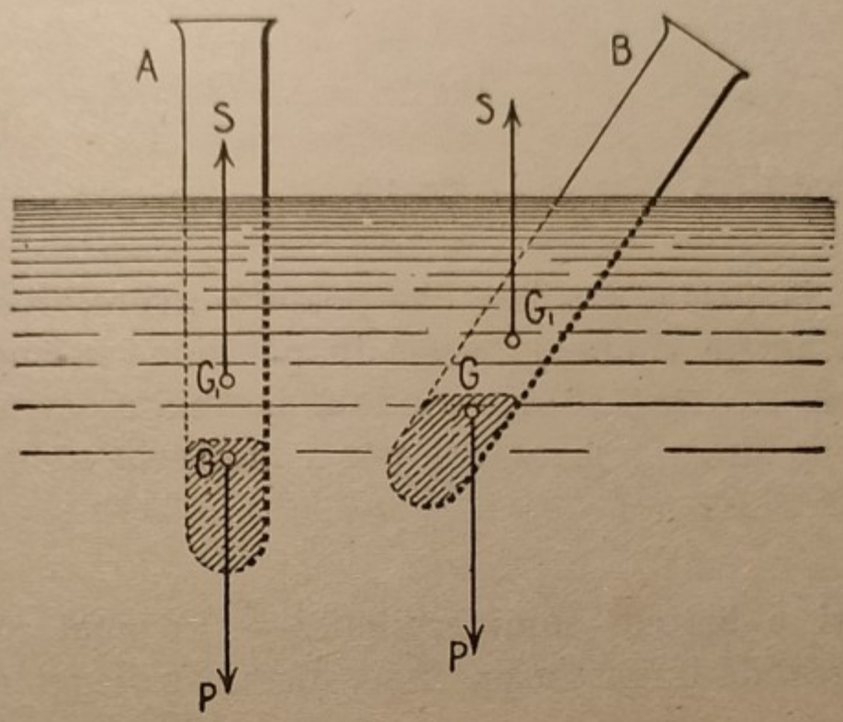


Fig. 119.

Poichè dunque un galleggiante è soggetto a due forze verticali, che sono il suo peso e la spinta che riceve dal liquido, per l'equilibrio è necessario: 1° *che il centro di gravità del corpo e il centro di spinta sieno sulla stessa verticale;* 2° *che il peso del corpo sia eguale al peso del liquido spostato dalla parte immersa.*

Ma l'equilibrio di un galleggiante abbandonato a se stesso o è indifferente o stabile. È indifferente, ad esempio in una sfera di sughero, che galleggiando sull'acqua vi si immerge per circa un quarto del suo volume; in essa, per qualunque posizione, il peso GP e la spinta G_1S giaciono sempre sulla stessa verticale (fig. 118).

È stabile per una provetta di vetro A (fig. 119) disposta verticale, contenente sul fondo dei pallini di piombo; inclinandola, come in B le forze, peso GP e spinta G_1S formano una coppia che riporta la provetta nella posizione A. I pallini di piombo costituenti la *zavorra* abbassano di molto il centro di

gravità e servono a realizzare più facilmente l'equilibrio stabile delle provetta in posizione verticale.

Certi galleggianti possono trovarsi in equilibrio stabile

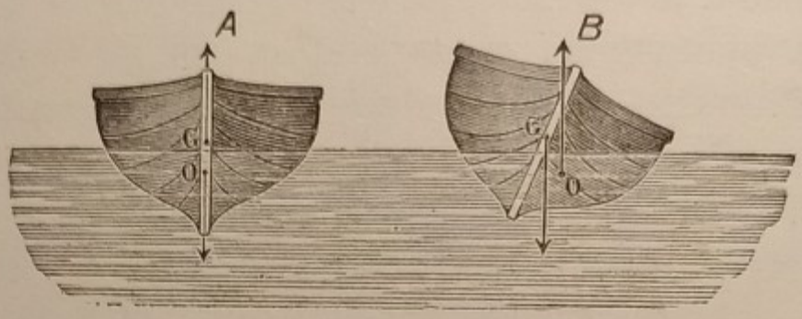


Fig. 120

anche per la forma speciale che possono avere. Così galleggia una barca anche vuota, la quale in posizione normale assume la posizione *A* (fig. 120) e quando è inclinata, come in *B*, la coppia delle due forze agisce per rimetterla nella posizione normale.

51. Navi e battelli sommergibili. — Le *navi* sono galleggianti di grande importanza. Esse, oltre a galleggiare, possono

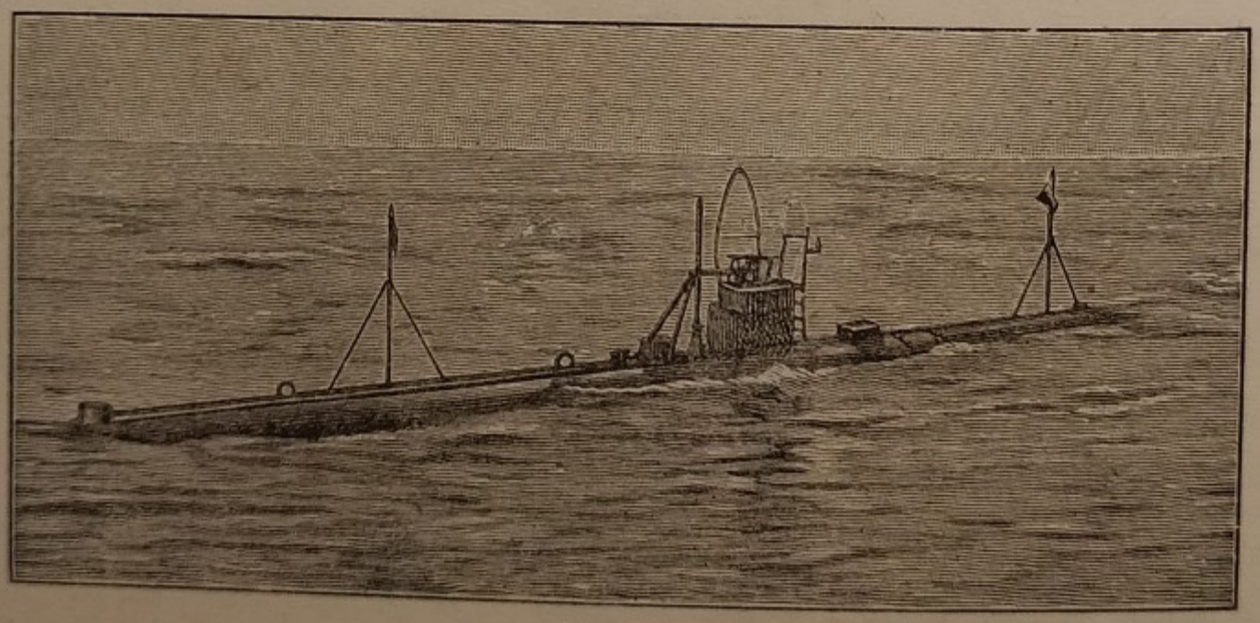


Fig. 121.

spostarsi alla superficie delle acque con velocità notevoli. Il loro moto si ottiene oggi per effetto del moto rotatorio che adatti motori — macchine a vapore, motori elettrici, a

scoppio, ecc. — imprimono ad una o più eliche ad asse orizzontale, poste di solito nella parte posteriore della nave.

I *sommergibili* (fig. 121) sono navi particolari che possono navigare sia sopra che sotto l'acqua. Il sommergibile può navigare o alla superficie dell'acqua come una nave ordinaria, o più o meno immerso sì da avere sporgente la torretta di comando, dai finestrini della quale il comandante può esaminare l'orizzonte. Può anche immergersi maggiormente tanto da lasciare sporgente appena l'estremità superiore del *periscopio*, che è un tubo con lenti e prismi atto a trasmettere all'occhio dell'osservatore, che sta nel sommergibile, il panorama dell'orizzonte.

Può infine navigare completamente sommerso ad una profondità maggiore dell'altezza del periscopio; in tal caso il sommergibile si trova nelle condizioni di una nave ordinaria immersa in una fitta nebbia, e non ha altro mezzo di direzione che la bussola.

La figura 121 riproduce un sommergibile in navigazione sopracquea.

Qualunque tipo di sommergibile è costituito di due scafi, l'uno dentro l'altro (fig. 122). L'interspazio *W W* fra i due scafi forma il serbatoio per la zavorra d'acqua; ma tale serbatoio è pieno di aria quando il battello naviga alla superficie (fig. 123, *A*). Facendo invadere più o meno dall'acqua tale serbatoio (fig. 123 *B*, *C*), per l'aumento di peso, il sommergibile si affonda più o meno; ma anche quando il serbatoio sia tutto occupato dall'acqua, la spinta supera sempre il peso per lo meno del 25 % e in certi casi anche del 45 %. Per tal ragione se il battello immerso viene abbandonato a sè stesso, ha sempre una tendenza a risalire alla superficie. Perciò l'immersione è ottenuta meccanicamente. A tale scopo il sommergibile porta dei timoni, detti *timoni di profondità*, girevoli attorno ad un

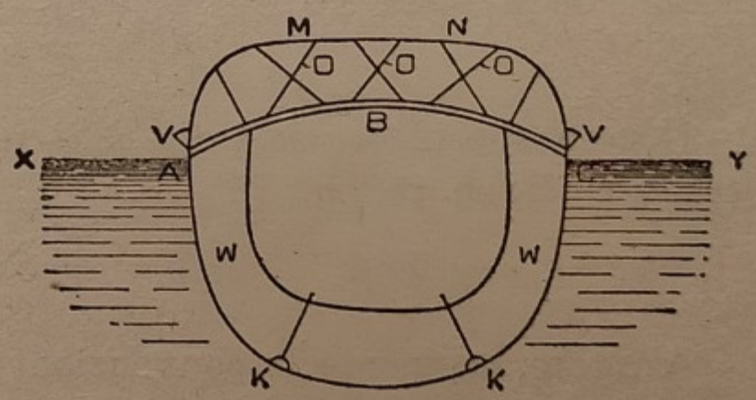


Fig. 122.

asse orizzontale, variando l'inclinazione dei quali, si riesce ad inclinare a piacimento l'asse del sommergibile nella stessa maniera che in una nave ordinaria, col solito timone girevole

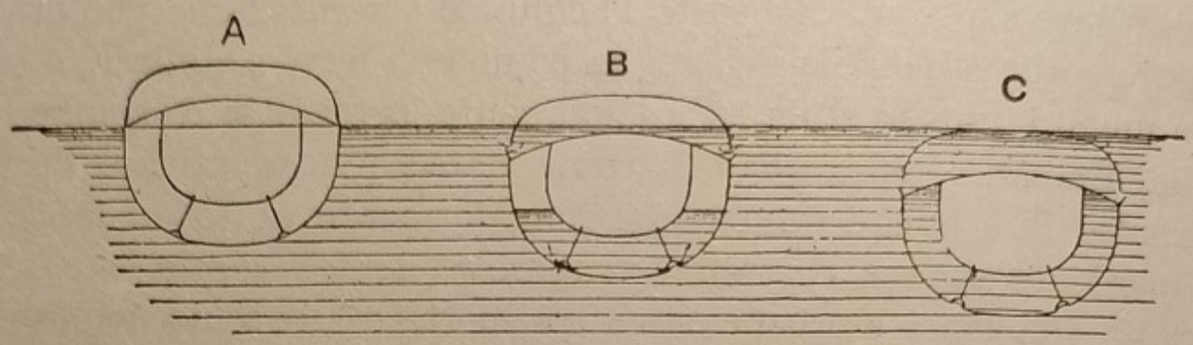


Fig. 123.

intorno a un asse verticale, si può variare a piacimento la direzione di rotta.

Applicazioni dei principî dell'idrostatica per la misura della densità.

52. Densità e peso specifico. — La densità *assoluta* d di un corpo *è il rapporto fra la sua massa M e il suo volume V:*

$$d = \frac{M}{V}. \qquad (1)$$

Il peso specifico *assoluto* p *è il rapporto fra il peso P del corpo e il suo volume V:*

$$p = \frac{P}{V}. \qquad (2)$$

A rigore, seguendo le convenzioni stabilite nella meccanica, la massa M, il peso P e il volume V del corpo vanno misurati rispettivamente in grammi-massa, in dine e in centimetri cubi.

Ma di solito si dà il nome di peso alla massa di un corpo e allora la densità di un corpo e il suo peso specifico coincidono; perciò indifferentemente si dice che 13,6 è la densità e anche il peso specifico del mercurio.

Nella scienza e anche nelle applicazioni, si parla di densità *relativa* e di peso specifico *relativo*. Essi sono il rapporto fra la massa o il peso del corpo e la massa o il peso di un pari volume di un altro corpo che si prende convenzionalmente come

termine di confronto. Per i corpi solidi e liquidi il corpo di riferimento è l'acqua, per i gas l'aria o l'idrogeno. Si noti allora che la densità assoluta di un corpo coincide con la densità relativa all'acqua, dappoichè 1^{cm^3} d'acqua contenendo 1 grammo-massa d'acqua, il numero che misura il volume di un corpo in cm^3 misura anche la massa in grammi-massa di un parivolume d'acqua.

La misura d'una densità richiede adunque la conoscenza della massa del corpo, che potremo avere con la bilancia, e del volume del corpo. La misura del volume di un corpo solido è l'operazione più importante, trattandosi quasi sempre di corpi di forma irregolare. Un metodo eccellente è quello della *boccetta* o *picnometro*. La forma adatta particolarmente per i solidi è una piccola boccia chiusa da un turacciolo smerigliato cavo che porta un cannello attorno al quale è tracciato un segno, detto *segno* o *punto di riferimento* (fig. 124).

La boccetta viene riempita d'acqua distillata, che si fa arrivare esattamente fino al punto di riferimento. Ben asciugata, la si colloca sopra il piatto della bilancia, e vicino ad essa si pone un frammento del corpo. Si fa la tara della boccetta e del corpo; si leva poi il corpo e lo si sostituisce con M grammi. M è la massa del corpo.

Fig. 124.

I pesi campioni e la boccetta vengono tolti via, e si introduce il corpo nella boccetta, avendo cura di eliminare le bollicine d'aria che il corpo tiene aderenti. Si regola ancora la quantità d'acqua finchè arrivi al punto di riferimento, si asciuga la boccetta e la si ripone sul piatto della bilancia.

Fig. 125.

Siccome è uscito un volume d'acqua eguale al volume del corpo, si dovranno porre M' grammi vicino alla boccetta per riavere l'equilibrio. M' misura la massa dell'acqua spostata dal corpo e per conseguenza il volume del corpo stesso, ammesso che la temperatura dell'acqua sia di 4° C.

La densità d del corpo sarà dunque:

$$d = \frac{M}{M'}.$$

La boccetta per i *liquidi* è formata di un corpo principale, di un cannello sottile su cui è tracciato il punto di riferimento e di una specie di imbuto superiore chiuso da uno dei soliti tappi smerigliati (fig. 125).

Si pesa la boccetta vuota e la si ripesa, dopo averla riempita del liquido fino al segno tracciato sul cannello; si deduce così per differenza la massa del liquido. Poscia la si riempie d'acqua fino allo stesso punto, e si ottiene, ancora per differenza con la prima pesata, la massa di un egual volume di acqua. Dividendo fra loro i due numeri, si avrà la densità cercata.

In certi casi, particolarmente quando si tratta di un corpo solido di dimensioni rilevanti e non lo si può spezzare in modo da procurarsi dei frammenti che possano introdursi nella boccetta, si adopera il *metodo della bilancia idrostatica.* Il corpo viene sospeso mediante un sottil filo sotto uno dei piatti della bilancia idrostatica (49), e fattane la tara, lo s'immerge nell'acqua distillata. Gli M' grammi che si devono porre sul piattello che sostiene il corpo, per ottenere l'equilibrio, misurano, per il principio di Archimede, la spinta subìta dal corpo, ovverosia la massa dell'acqua spostata, cioè il volume del corpo in centimetri cubi. In seguito staccato il corpo, lasciando a posto il filo di sospensione e tolti i pesi M', si ristabilisce l'equilibrio con un adatto numero M di grammi campioni. M è perciò la massa del corpo e per conseguenza la densità cercata sarà il rapporto $M : M'$.

Per i *liquidi*, si sospende al disotto di uno dei piatti della bilancia idrostatica, mediante un filo di platino, una bolla di vetro zavorrata con mercurio o pallini di piombo e se ne fa la tara. Tale bolla viene immersa completamente nel liquido, e si ristabilisce l'equilibrio con un peso M, che rappresenta la spinta, ossia la massa del liquido spostato in grammi.

Nella stessa maniera si ottiene la massa in grammi M' dell'acqua spostata dalla stessa bolla, e il rapporto $M : M'$ misura la densità cercata.

53. Areometri a peso costante. — Un altro metodo molto spiccio, usato particolarmente per bisogni commerciali e industriali, anche se non dà risultati molto rigorosi, è quello degli *areometri a peso costante*. Essi sono dei galleggianti tutti in vetro, formati di un tubo cilindrico, zavorrato in modo da mantenersi verticali nei liquidi. A tale scopo portano una grossa bolla di vetro in basso piena d'aria, che conferisce all'apparecchio la leggerezza sufficiente per galleggiare, seguìta da una bolla più piccola zavorrata con mercurio o pallini di piombo affinchè l'apparecchio galleggi stabilmente in posizione verticale (50). Il peso del liquido spostato è sempre eguale al peso del galleggiante, perciò questo deve spostare un maggior volume del liquido meno denso, cioè deve affondarvisi di più.

Tali areometri per semplice lettura possono anche indicare la densità del liquido, ma più spesso ne indicano il grado di concentrazione, che talvolta è in relazione col prezzo del liquido.

Descriviamo i più usati.

Il *pesa-acidi* Baumé (fig. 126, *A*), che serve per i liquidi *più densi* dell'acqua, è zavorrato in modo che nell'acqua pura il punto di affioramento, segnato con 0, è situato verso *l'alto* del cannello. L'apparecchio viene posto in seguito in una soluzione di 85 parti in peso d'acqua e 15 di sal marino; nel punto di affioramento, che sta sotto quello dell'acqua, si segna 15. L'intervallo da 0 a 15 viene diviso in 15 parti eguali, e la graduazione viene prolungata fino al basso. Il cannello è abbastanza lungo da portare 70 divisioni. Lo strumento segna 66° nell'acido solforico concentrato.

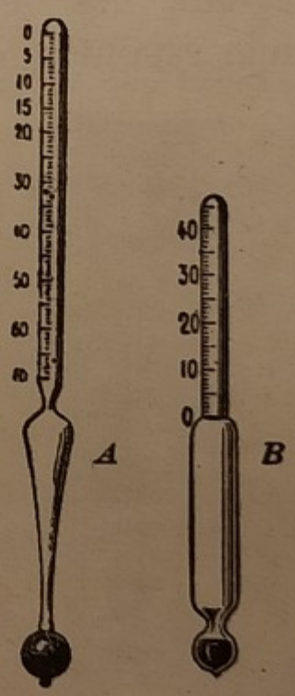


Fig. 126.

Il *pesa-spiriti* Baumé (fig. 126, *B*), impiegato per i liquidi *meno densi* dell'acqua, è zavorrato in modo da immergersi fino ad un punto che sta vicino all'estremità inferiore del cannello, in una soluzione di 90 parti in peso d'acqua e 10 di sal marino. Al punto di affioramento si segna 0. Nell'acqua pura s'affonda di più,

e si segna 10 al punto di affioramento. Si divide l'intervallo in 10 parti eguali, e si prolunga la graduazione fino alla sommità del cannello. Lo strumento segna 66° nell'etere del commercio, 47°,5 nell'alcool assoluto.

Per convenzione stabilita, la graduazione dei due areometri va fatta mantenendo i liquidi descritti alla temperatura di 12°.

L'*alcoolometro centesimale* di Gay-Lussac è costruito per conoscere direttamente il *volume* di *alcool puro* che contengono 100 volumi d'una miscela di alcool ed acqua. È zavorrato in modo che nell'acqua pura il punto di affioramento è verso il basso del cannello, dove è segnato 0 (fig. 127). Per farne la graduazione si versano in una serie di provette graduate 5, 10, 15...95 volumi di alcool puro; e si completa in tutte il volume 100 con l'aggiunta di quantità conveniente d'acqua.

Si immerge l'areometro nelle successive provette, e si segna 5 nel punto di affioramento nella prima miscela, 10 nella seconda, ecc., 100 nell'alcool puro. Le divisioni principali così ottenute non sono equidistanti; tali divisioni vanno perciò divise ciascuna in 5 parti che per conseguenza non saranno eguali, ma verranno fatte con adatti procedimenti che qui non esponiamo. In tal modo fra lo 0 e il 100 abbiamo 100 divisioni; e così se l'areometro immerso nello spirito del commercio segna 92, significa che su 100 cm³ di tal liquido 92 sono di alcool puro.

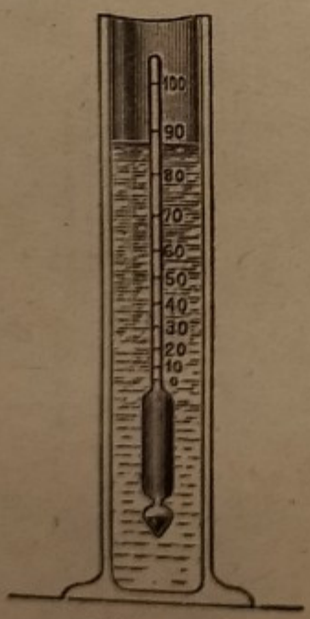


Fig. 127.

Ed è appunto tale grandezza che importa conoscere sia nel commercio, e sia in relazione alla imposta fiscale sulla fabbricazione dell'alcool. In questo caso la tassa è fissata in lire per ogni *ettanidro*, cioè a dire per ogni *ettolitro* di alcool *anidro*, ossia puro; di guisa che se la tassa fosse di L. 1000 per *ettanidro*, una fabbrica che producesse alcool al 90% pagherebbe, per ogni ettolitro di tale alcool, L. 900.

Le indicazioni dell'alcoolometro si riferiscono alla temperatura convenzionale di 15°; le osservazioni fatte a tempera-

tura differente da questa vanno corrette col mezzo di tavole dovute al Gay-Lussac stesso.

Risulta ancora, da quanto si è spiegato, che l'alcoolometro può servire solo pei miscugli di alcool ed acqua; se si volesse conoscere la quantità di alcool contenuto in un liquido, come il vino, il quale contiene, oltre l'acqua e l'alcool, sostanze diverse, bisogna sottoporlo alla distillazione, la quale fornisce la totalità dell'alcool mescolato con una quantità variabile di acqua. In tal caso presi 100 cm³ di vino lo si distilla fino a ottenere circa 35 cm³ di liquido distillato; a questo punto il liquido distillato contiene tutto l'alcool che c'era nel vino. Al liquido distillato si aggiunge dell'acqua fino a portare il volume a 100 cm³ e il grado alcoolico di quest'ultima soluzione sarà quello del vino che si esamina.

Il *densimetro* è anche un areometro, che dà direttamente la densità. La graduazione vien fatta preparando prima delle soluzioni aventi densità 1, 1,1, 1,2, 1,3 . . . 2; 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 e nei punti di affioramento si segnano rispettivamente questi numeri.

Notisi infine che gli areometri ci forniscono più o meno le densità dei liquidi, ma non ci dànno cognizione della natura del liquido: una verifica areometrica è dunque assolutamente illusoria, dal punto di vista della purezza del prodotto, allor quando sia possibile comporre la densità normale di questo, coll'introduzione di sostanze diverse. Così sarebbe assurdo esigere di conoscere la purezza del latte col *lattodensimetro* che è in sostanza un densimetro con graduazione che va da 1,000 a 1,050.

Un latte normale segna al lattodensimetro da 1,028 a 1,034, ma la stessa densità si può comporre *sottraendo* della *crema* al latte, operazione che ne aumenta la densità, e *aggiungendo* una conveniente quantità d'*acqua* che produce l'effetto inverso.

51. Densità delle sostanze più comuni.

CORPI SEMPLICI

Alluminio	a 20°	2,70
Argento	»	10,503
Diamante	—	3,52

Rame	a 20°	8,93
Ferro	—	7,96
Magnesio	a 5°	1,74
Nickel	a 15°	8,8
Oro	a 20°	19,268
Platino	—	21,4
Potassio	a 13°	0,875
Sodio	a 13°	0,972
Zinco	a 22°	7,127

LIQUIDI

Mercurio	a 0°	13,59552
Acido solforico	a 15°	1,842
Alcool etilico	»	0,7936
Etere etilico	»	0,7191
Glicerina	»	1,2625
Toluene	»	0,8705
Olio di oliva	»	0,915-0,9182

55. Livella a bolla. — Serve a *verificare l'orizzontalità di una retta* sulla quale è posta. È costituita di un tubo di vetro, chiuso ai due estremi e leggermente convesso, che contiene un liquido assai scorrevole, quale alcool, benzina od etere. Il liquido non lo riempie totalmente, di modo che resta dentro una bolla d'aria o semplicemente del vapore del liquido stesso. Il tubo è chiuso in un astuccio di ottone unito a un regolo, che

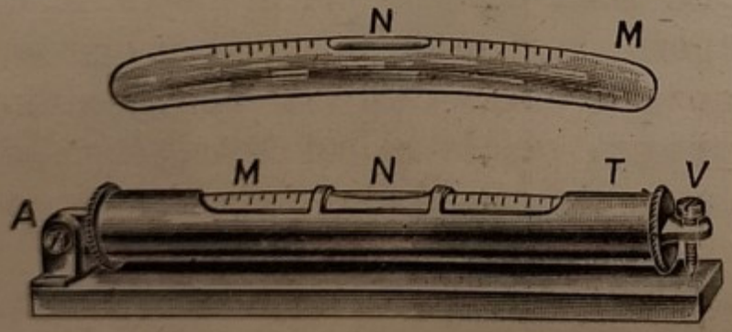


Fig. 128.

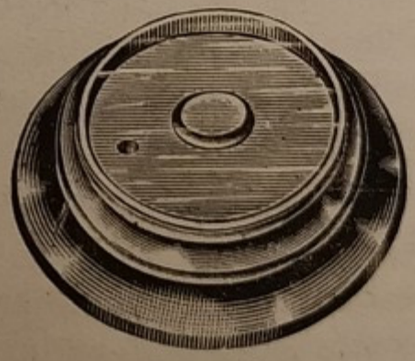


Fig. 129.

ne costituisce la base, in modo che quando questa è disposta sopra una retta orizzontale, la bolla, che occupa sempre la sommità del tubo, viene a trovarsi esattamente nell'intervallo compreso fra due gruppi di divisioni equidistanti segnate sulla convessità del tubo di vetro (fig. 128).

Per riconoscere se un certo piano è orizzontale, si dispone la base della livella secondo due rette del piano, presso a

poco perpendicolari fra loro; se il piano è orizzontale lo sono anche le dette rette, talchè nei due casi la bolla occupa la giusta posizione.

Talvolta è usata anche la *livella a bolla circolare* (fig. 129). Essa è formata di una scatola metallica a base circolare, chiusa in alto da un vetro rotondo, leggermente convesso. La scatola, come la livella precedentemente descritta, contiene un liquido scorrevole, spesso colorato, e una piccola bolla che, mantenendo una forma circolare, occupa sempre la regione più alta del vetro. Quando la livella poggia sopra un piano orizzontale la bolla si trova esattamente compresa entro una incisione circolare tracciata sul vetro. Questa livella non consente il grado di esattezza dell'altra, ma è di rapido uso, perchè basta appoggiarla sopra un piano per giudicarne senz'altro la orizzontalità. La troviamo spesso unita a certi modelli di macchine fotografiche portatili.

Meccanica dei gas.

56. Proprietà principali dei gas. — I gas sono fluidi *espandibili*, *compressibili* ed *elastici*; ciò è stato dimostrato al § 4. Per effetto della sua espandibilità, un gas riempie sempre tutto il vaso che lo racchiude, in luogo di occuparne solamente la parte inferiore, come fa un liquido, sicchè un gas non ha una superficie libera.

Il *principio di Pascal* si applica ai gas come si può verificare coll'apparecchio della figura 130. Un pallone di vetro pieno d'aria porta un tubo cilindrico in cui può scorrere uno stantuffo a perfetta tenuta ed è munito di orifizi in varî punti, ai quali sono applicati altrettanti tubi ad **U**, contenenti dell'acqua colorata o mercurio.

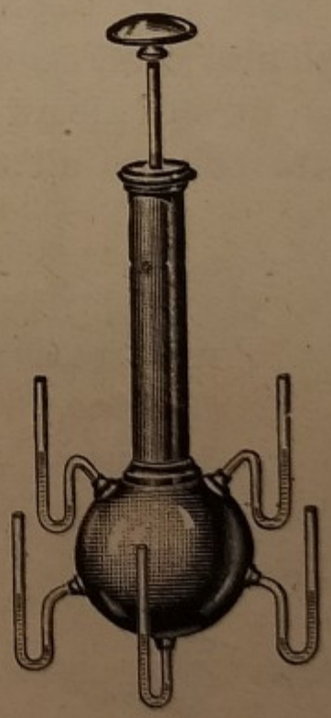


Fig. 130.

Comprimendo il gas, in ciascun tubo si verifica la stessa differenza di livello.

Come si è detto dei liquidi (41), intenderemo per *pressione*

di un gas la forza con cui esso preme sopra 1 cm^2 di superficie delle pareti del recipiente.

Fu Galileo il primo a dimostrare che *l'aria è pesante*, contro le affermazioni della scuola aristotelica. Per fare l'esperienza, si mette su uno dei piatti della bilancia un grande pallone di vetro (fig. 131), pieno d'aria, munito di robinetto, e se ne fa la tara.

Fig. 131.

Fatto il vuoto nel pallone e rimessolo sulla bilancia, il giogo s'inclina dalla parte della tara. Per riavere l'equilibrio si devono aggiungere dalla parte del pallone alcuni grammi che sostituiscono il gas estratto; per l'aria occorre poco più di un grammo per ogni litro di capacità del pallone. Il fisico Régnault, nel 1860 a Parigi, trovò che un *litro d'aria pura e secca nelle condizioni normali*, cioè alla temperatura di 0° e alla pressione di kg. 1,033 per centimetro quadrato, pesa gr. 1,293, vale a dire circa $\frac{1}{773}$ dell'acqua.

Nel § 52 abbiamo detto che la densità dei gas va riferita all'aria o all'idrogeno; la seguente tabella riporta la massa di un litro di alcuni aeriformi nelle condizioni normali, e la densità rispetto all'aria.

	Massa di un litro in grammi	Densità relativa all'aria
Aria secca	1,29284	1
Ossigeno	1,4290	1,10535
Azoto	1,2507	0,96737
Idrogeno	0,08987	0,0695
Cloro	3,214	2,491
Anidride carbonica	1,9768	1,5291
Elio	0,1778	0,1375
Metano	0,7168	0,5544

57. Pressione atmosferica. — L'*atmosfera* è la massa d'aria che avvolge la Terra per uno spessore non determinato;

essa, per effetto della gravità, rimane unita alla Terra e la segue nei suoi movimenti di rotazione e di traslazione. L'atmosfera non è omogenea, il peso degli strati superiori comprime gli strati inferiori, per cui la densità cresce via via che ci si avvicina al suolo. Ed è in grazia del peso dell'aria che la superficie della Terra può essere considerata come il fondo di un vaso (46), e per effetto del principio di Pascal, applicabile anche agli aeriformi, i corpi immersi nell'aria sono premuti su ogni punto della loro superficie da una forza, che è normale alla superficie stessa. Ma nel caso di un corpo immerso nell'aria, la forza F da cui è premuta una porzione S della superficie, non può calcolarsi colla formola $F = Shp$ (46), perchè non si conosce nè l'altezza dell'atmosfera, nè la legge esatta con cui la densità dell'aria diminuisce coll'altezza. Ma tale forza si può valutare per mezzo della seguente esperienza di Torricelli.

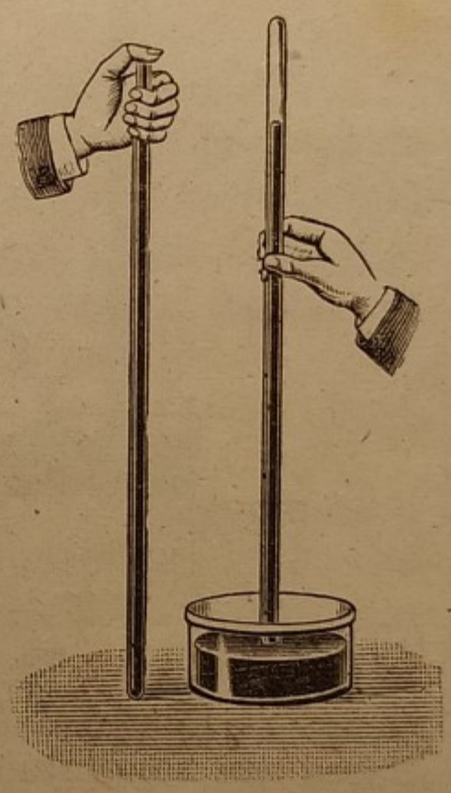


Fig. 132.

Una canna di vetro, lunga circa un metro, chiusa ad un estremo, viene riempita di mercurio, avendo cura che la canna e il mercurio sieno ben puliti ed asciutti, e che non restino bollicine d'aria aderenti alle pareti; poi la si capovolge, tenendola chiusa inferiormente col dito, su di una vaschetta piena di mercurio. Liberando l'orifizio inferiore (fig. 132), si constata che una parte del mercurio esce dalla canna, ma il liquido si ferma in questa a una certa altezza. Se l'esperienza viene fatta al livello del mare, il dislivello fra le superficie libere del mercurio nella vaschetta e nella canna è in media di 76 cm.

Tale apparecchio viene detto *barometro*. Nella parte superiore della canna, abbandonata dal mercurio, detta *camera barometrica*, si ha il *vuoto*, detto vuoto *barometrico* o *torricelliano*.

L'altezza a cui si ferma il mercurio nel tubo non dipende nè dal diametro, nè dalla forma, nè dalla inclinazione del

tubo AB (fig. 133). La distanza *verticale* BD delle due superficie libere nel tubo e nella vaschetta, si chiama *altezza barometrica*.

È facile interpretare l'esperienza descritta. Nell'apparecchio la massa di mercurio è in equilibrio tanto nel tubo quanto nella vaschetta, perciò la forza premente deve essere la stessa su due aree eguali mn e $m'n'$ prese sul piano orizzontale che comprende la superficie libera della vaschetta (fig. 134). Nel tubo

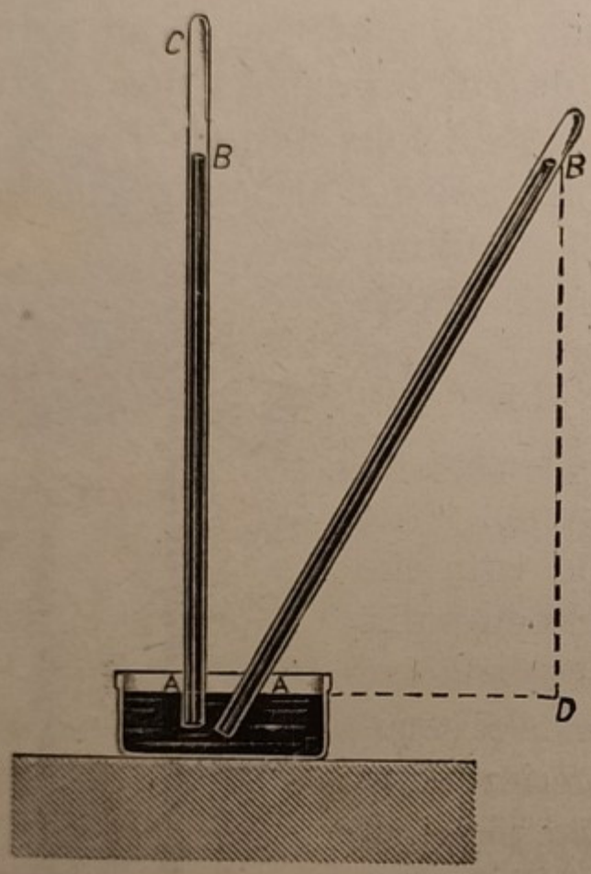


Fig. 133.

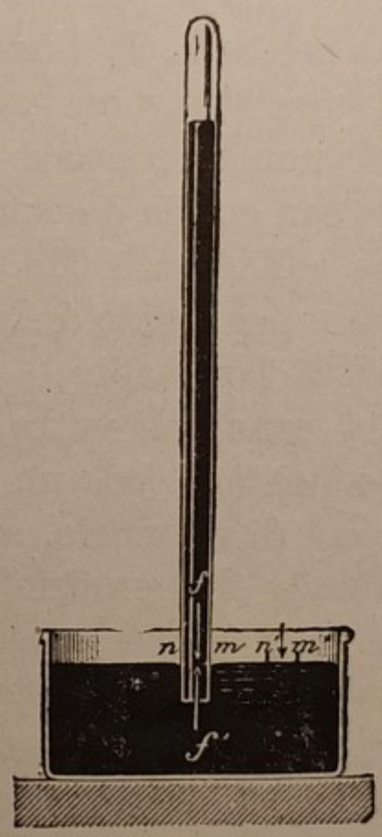


Fig. 134.

l'area mn sopporta una forza eguale solo al peso di una colonna di mercurio che ha per base mn e per altezza l'altezza del liquido, perchè nella camera barometrica la pressione è zero. Sull'area $m'n'$ esterna agisce solo la pressione atmosferica, perciò questa è misurata da quella, cioè dal peso di una colonna di mercurio che ha per base mn e per altezza l'altezza barometrica.

In base a tale semplice ragionamento riesce facile di valutare la forza con cui l'atmosfera agisce sopra un'area di 1 cm², isolata sulla superficie di un corpo qualunque immerso nel-

l'aria nel luogo dove si trova il barometro. Posto che l'altezza barometrica sia di 76 cm., per la nota formola $F = Shp$ si ha $F = 1 \times 76 \times 13{,}6 = 1033$ grammi, poichè la densità del mercurio è appunto 13,6 circa.

Tale pressione è anzi presa come *unità* di misura delle pressioni, e la si dice pressione *di una atmosfera* (64).

Sopra un'area di S^{cm^2} l'atmosfera agisce dunque con una forza di $1033S$ grammi; di modo che un liquido qualunque di densità p, per premere sopra tale area con la stessa forza, dovrà avere un'altezza h che soddisfi alla formola $Shp = 10{,}33S$, ossia:

$$h = \frac{1033}{p} \text{ cm.}$$

Per l'acqua, essendo $p = 1$, si ha $h = 1033$ cm.

Infine, risulta chiaro che se un barometro viene portato sotto la campana della macchina pneumatica e si estrae l'aria che preme sulla superficie libera del mercurio nella vaschetta, la colonna di mercurio deve diminuire di altezza. Lo stesso avviene se l'apparecchio viene portato in alto.

58. Effetti della pressione atmosferica. — La pressione atmosferica che al livello del mare ha il valor medio, tutt'altro che trascurabile, di circa 1 kg. per cm², non manifesta d'ordinario effetti sensibili sui corpi, poichè esercitandosi normalmente su ciascun punto della loro superficie, ne risulta semplicemente una *spinta di Archimede* (59), diretta verticalmente dal basso in alto ed eguale al peso dell'aria spostata.

Ma se si diminuisce in qualche modo la forza dovuta alla pressione sopra una parte della superficie del corpo, la pressione esercitantesi sulla rimanente superficie, non essendo più equilibrata, provoca dei fenomeni che possono assumere una notevole importanza.

Ciò è, ad esempio, dimostrato colle seguenti esperienze. Il *crepavesciche* è una specie di campana di vetro che porta una larga apertura anche in alto. La campana viene poggiata sul

piatto della macchina pneumatica, mentre l'apertura superiore viene chiusa legandovi strettamente una foglia di gomma elastica (fig. 135). Dapprincipio la membrana è piana, perchè è tesa e perchè l'aria agisce sulle due faccie con forze eguali ed opposte che si fanno equilibrio; ma se si toglie lentamente l'aria dalla campana, si osserva che col diminuire della pressione interna, la pressione esterna rende via via sempre più concava la faccia esterna della membrana, che può in tal modo assumere la forma di un'ampia borsa. Se si ripete l'esperienza sostituendo la lamina di gomma, con un pezzo di sottile vescica o un foglio di sottile carta impermeabile, la membrana, essendo poco estensibile, ad un certo punto si rompe fragorosamente (figura 136).

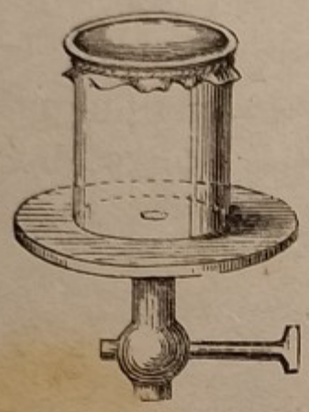


Fig. 135.

Gli *emisferi di Magdeburgo* sono due semisfere cave in ottone di circa 10 cm. di diametro, aventi i bordi lavorati in modo che, semplicemente interponendovi un po' di sevo, costituiscono una sfera cava a perfetta tenuta (fig. 137). Uno dei due emisferi porta un tubo a robinetto che si avvita alla macchina pneumatica, l'altro emisfero

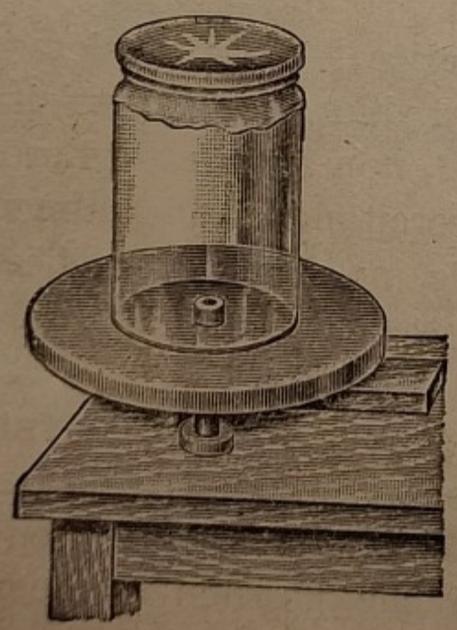


Fig. 136.

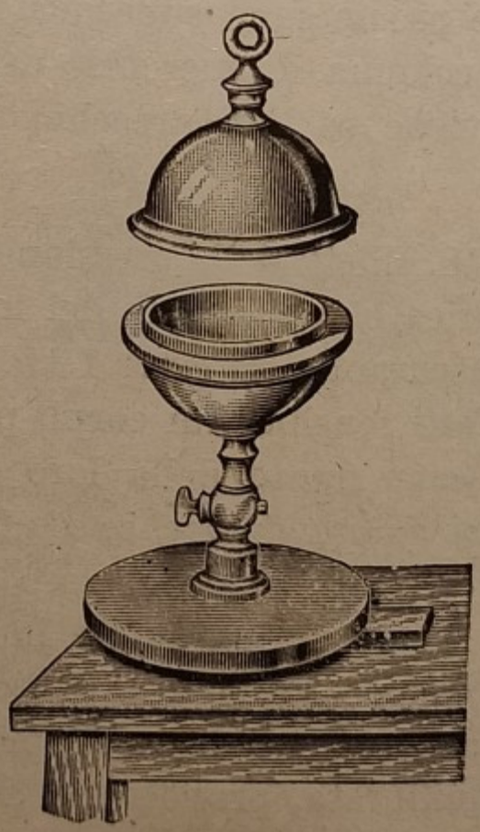


Fig. 137.

porta un anello. Estratta l'aria interna e chiuso il robinetto, occorre una forza rilevante per separare i due emisferi, mantenuti fortemente uniti dalla pressione atmosferica.
Aprendo il robinetto, l'aria entra sibilando, e i due emisferi si separano agevolmente, perchè in tal caso la pressione esterna è equilibrata dalla pressione interna.

Fig. 138.

Altre facili prove si possono dare dell'esistenza della pressione atmosferica. Un bicchiere da tavola, riempito completamente di acqua, viene capovolto dopo averne chiusa l'apertura con un pezzo di carta (fig. 138).

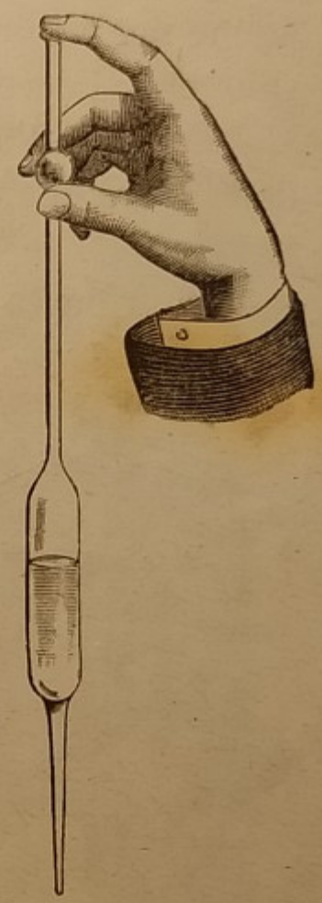


Fig. 139.

La pressione atmosferica impedisce all'acqua di cadere malgrado che il foglio che fa da fondo del vaso, sopporti una discreta pressione da parte del liquido soprastante. E così si spiega il funzionamento della *pipetta* (fig. 139), dall'orifizio inferiore della quale l'acqua non effluisce affatto finchè si tiene chiuso col dito il foro superiore. In questo caso è la sottile membrana liquida, tesa a traverso l'orifizio inferiore, che fa le veci del foglio di carta nell'esperienza del bicchiere capovolto.

59. Principio di Archimede nei gas. — Nel paragrafo che precede abbiamo dichiarato che il principio di Archimede vale anche nei gas; ed ha lo stesso enunciato che gli abbiamo dato nei liquidi (49), cioè un corpo immerso in un gas sopporta su tutti i punti della sua superficie e normalmente a questa, delle forze, dovute alla pressione del gas, *che dànno luogo a una risultante verticale, detta spinta, diretta dal basso in alto e eguale in grandezza al peso del gas spostato.* Il principio nelle sue linee

generali è verificabile col *baroscopio* (fig. 140). Questo apparecchio è in sostanza una piccola bilancia da potersi collocare sotto una campana della macchina pneumatica. Ad una estremità del giogo è sospesa una grande sfera cava, all'altra una piccola sfera massiccia. Nell'aria le due sfere si fanno equilibrio; ciò perchè la sfera maggiore pesa più dell'altra, ma riceve anche per ragione del suo maggior volume una spinta maggiore, tale che l'eccesso della spinta compensa l'eccesso di peso. Rarefacendo l'aria si osserva che il giogo si abbassa dalla parte della sfera maggiore, perchè la differenza delle due spinte *va diminuendo* — nel vuoto tale differenza diventerebbe nulla — e non basta più a compensare l'eccesso di peso delle due sfere, che *rimane costante*. Fatta rientrare l'aria nella campana, il giogo si rimette orizzontale.

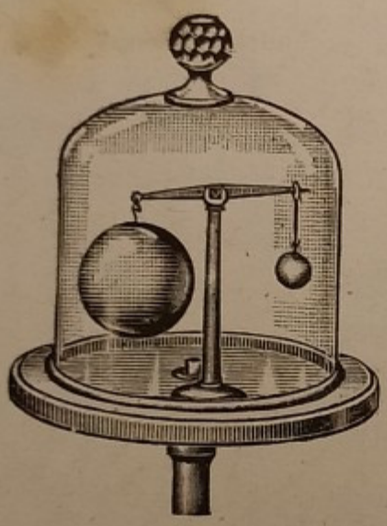


Fig. 140.

Le conseguenze del principio di Archimede applicato ai gas sono dell'ordine di quelle che abbiamo dedotte nei liquidi.

1° Un corpo *più pesante* del gas che sposta, lasciato libero, *cade*.

2° Un corpo *avente lo stesso peso* del gas spostato, si mantiene *sospeso in equilibrio*.

3° Un corpo *meno pesante* del gas spostato, lasciato libero, *s'innalza*, e se è libero nell'atmosfera, sale fino a raggiungere quello strato d'aria per il quale la spinta è eguale al peso. Quest'ultimo fenomeno è presentato dalle nubi, dal fumo e dai palloni aerostatici, di cui si parlerà in seguito.

60. Barometri a mercurio. — L'altezza barometrica di cui è fatto parola in precedenza, cioè la distanza verticale fra le superficie libere del mercurio nella vaschetta e nel tubo, varia colla altitudine; oltre a ciò essa subisce, nello stesso luogo, continue variazioni; infatti, in uno stesso luogo si notano spesso variazioni anche di 2 centimetri in più o in meno del valore normale.

A tali variazioni sono connessi i più importanti fenomeni meteorologici, cosicchè è molto utile seguirne esattamente e regolarmente l'andamento nei diversi luoghi e nei diversi tempi.

Il *barometro da laboratorio* (fig. 141), che chiameremo *barometro normale*, è formato con una canna di vetro avente un diametro di circa 3 cm., perchè la depressione capillare vi sia insensibile (14).

Una vite *A*, di lunghezza conosciuta, si conduce per ogni osservazione a sfiorare la superficie del mercurio della vaschetta, e si legge con un adatto apparecchio la differenza di livello fra la punta superiore della vite e il menisco del mercurio nella canna. L'altezza barometrica si ha aggiungendo a tale differenza la distanza fra le due punte della vite. Ma il mercurio diventa specificamente più leggero al crescere della temperatura, e quindi ad una stessa pressione atmosferica corrisponde un'altezza maggiore. Si vede adunque la necessità di determinare la temperatura all'atto dell'osservazione per avere il dato necessario a calcolare l'altezza che avrebbe la colonna se fosse a zero. A tal fine serve un termometro montato sulla stessa tavola su cui è fissato il barometro. Tutto l'apparecchio è solidamente fissato ad un muro maestro del laboratorio, perchè si trovi nelle migliori condizioni di stabilità.

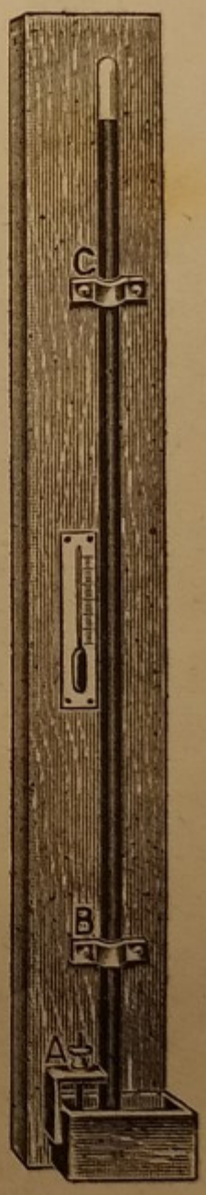


Fig. 141.

È quasi superfluo il notare che la canna barometrica deve essere riempita di mercurio puro e secco, con tutte le cautele che assicurino che nella camera barometrica non ci sia inizialmente, o si verifichi col tempo, qualsiasi traccia di umidità o di gas, in modo che la pressione nella camera barometrica sia costantemente nulla.

Negli *ordinari* barometri a mercurio, ci si accontenta di dare alla vaschetta una grande sezione, affinchè la quantità di mercurio che esce od entra nella canna, per effetto delle

variazioni di pressione atmosferica, vi produca una insensibile differenza di livello. Il tubo viene disposto ben verticale e di lato si pone parallelamente un regolo diviso in millimetri, avente lo zero che sfiora la superficie libera del mercurio nella vaschetta.

Il *barometro di Fortin* è un tipo di barometro che pur conservando una grande precisione, si presta ad essere trasportato in viaggio, come si richiede nella misura delle altitudini.

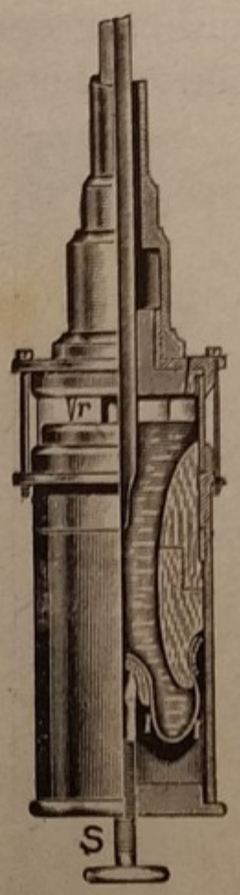


Fig. 142.

La parte originale di questo barometro è la vaschetta formata di un corto cilindro di vetro (fig. 142) compreso fra due anelli di legno, al superiore dei quali è unita la canna barometrica mediante un pezzo di pelle di camoscio, attraverso i pori della quale la pressione atmosferica esterna agisce sul mercurio della vaschetta. All'anello inferiore è legata una specie di borsa di cuoio *II*, che fa da fondo della vaschetta ed appoggia sopra una vite *S* che è impegnata nel fondo dell'astuccio metallico. I diversi pezzi sono tenuti insieme da tiranti a vite.

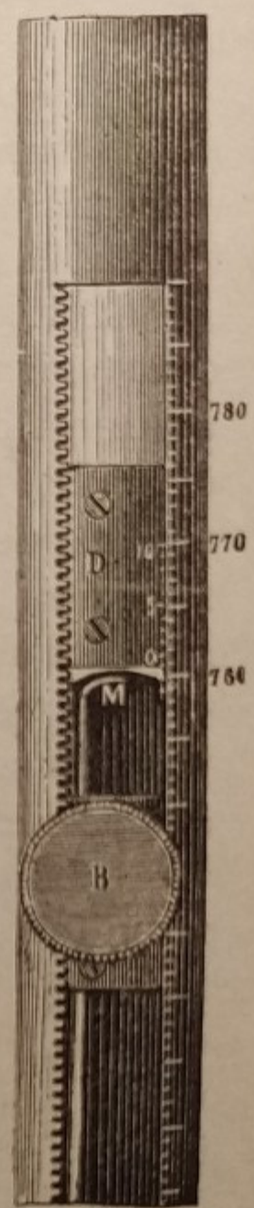


Fig. 143.

La scala è tracciata sopra una canna di ottone che avvolge il tubo barometrico e che porta verso l'alto due fenditure longitudinali opposte che lasciano vedere il mercurio (fig. 143). Per eseguire un'osservazione si gira la vite inferiore sì che il mercurio venga a sfiorare una punta fissa d'avorio *r* (fig. 142) che corrisponde allo zero della scala, e si nota a qual divisione della scala arriva il mercurio nella canna. A tale scopo mediante un bottone *B* (fig. 143), si fa muovere un corsoio *D*, il bordo inferiore del quale viene portato sul piano orizzontale che passa per il vertice *M* del menisco del mercurio nel tubo.

Prima di trasportare questo barometro, si gira la vite *S* (fig. 142) fino a che tutta l'aria sia uscita attraverso la pelle di camoscio, ed il mercurio riempia completamente la camera barometrica. In tali condizioni l'apparecchio si può inclinare, scuotere o capovolgere senza pericolo di inconvenienti. Pel trasporto lo si chiude in un astuccio (fig. 144) che aperto costituisce senz'altro un treppiede di supporto dell'apparecchio.

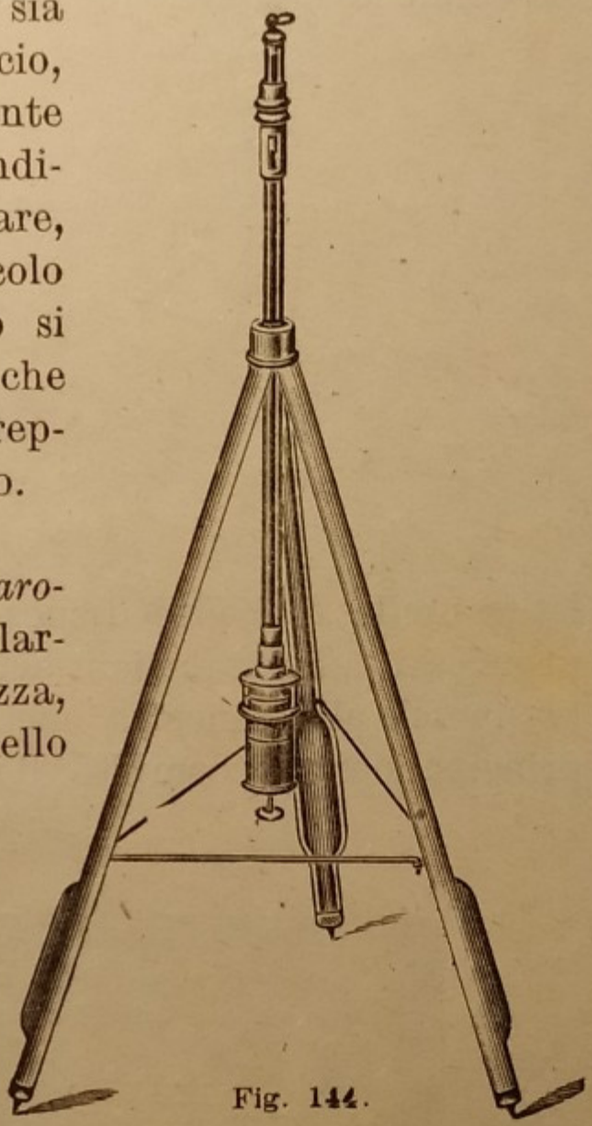


Fig. 144.

61. Barometri metallici. — Il *barometro metallico* è uno strumento largamente usato, che, a parte l'esattezza, è certamente assai più comodo di quello a mercurio.

Il tipo più comune è il barometro *olosterico* (fig. 145), che consiste in una scatola d'ottone molto piatta, ermeticamente chiusa e vuotata completamente d'aria. Le due basi sono di

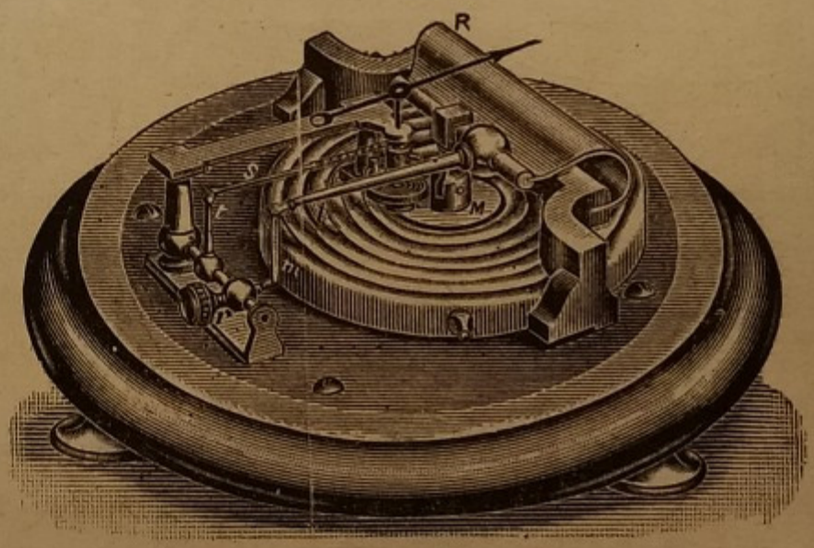


Fig. 145.

lamina sottile e rese molto flessibili da ondulazioni anulari, sì da piegarsi ad ogni piccola variazione di pressione. Il centro

della base inferiore è fissato alla custodia, mentre il centro del coperchio è fissato a un colonnino *M* raccomandato ad una

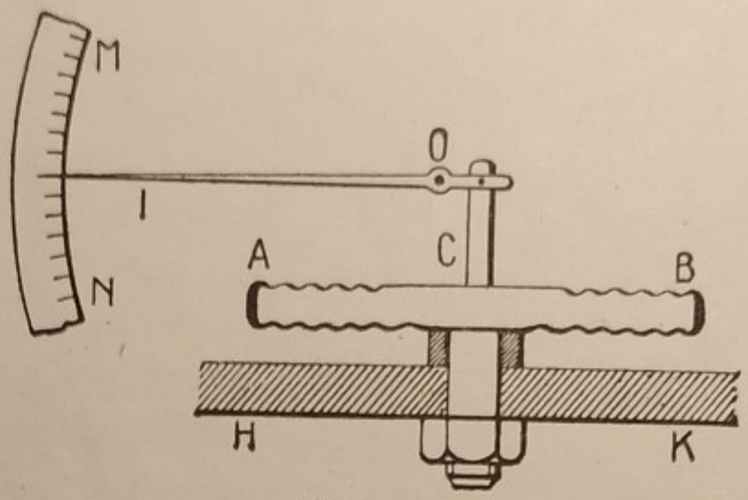


Fig. 146.

larga molla *R*. I piccoli spostamenti del centro del coperchio provocati dalle variazioni della pressione atmosferica, vengono trasmessi alla lancetta mediante diversi organi che hanno principalmente il compito di amplificarli fortemente.

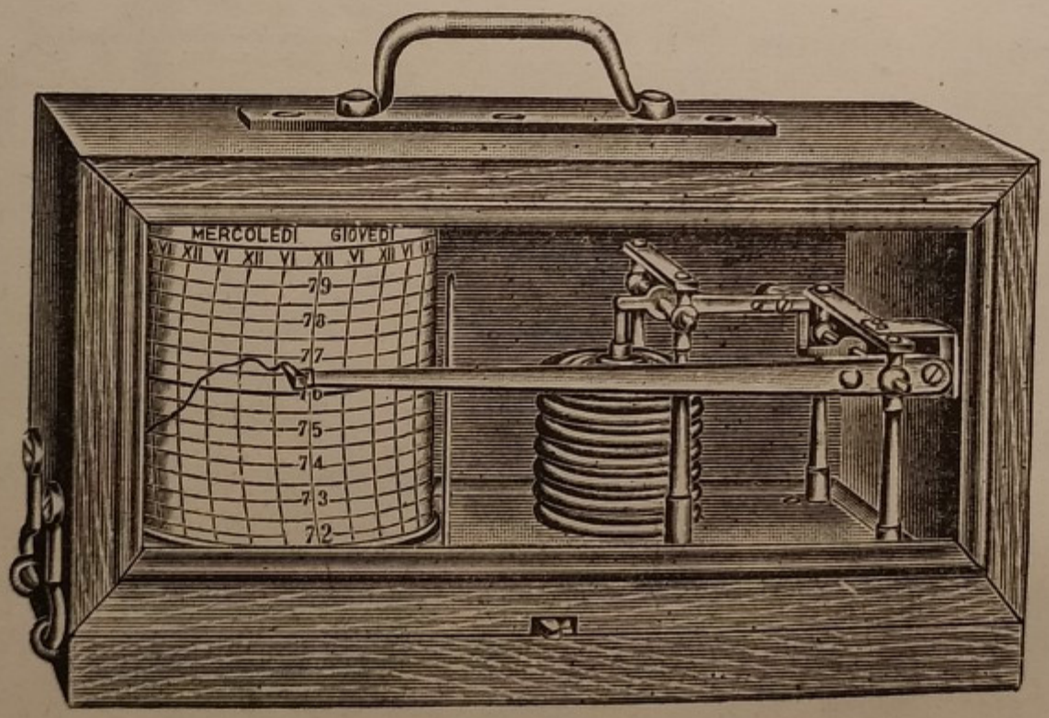


Fig. 147.

La figura 146 mostra schematicamente la struttura del barometro metallico: *AB* è la scatola in sezione, fissata nel centro della base inferiore. Il centro della base superiore abbassandosi o innalzandosi, per effetto di un aumento o di una diminuzione di pressione, trasmette i suoi movimenti da un indice *I* il cui estremo si muove sopra un arco graduato *MN*.

È facile intendere poi che la graduazione dei barometri metallici non si può fare che confrontandoli con quello a mercurio. Ma è da notarsi che col tempo si modifica la forma e la elasticità degli organi metallici, in guisa da rendere necessaria di quando in quando la revisione della graduazione.

Descriveremo infine il *barometro registratore* o *barografo* (fig. 147). In esso troviamo sovrapposte più scatole metalliche, come quelle del barometro metallico, unite in *serie*, cioè in modo che la base della scatola che sta sotto essendo unita ad un piano fisso, il centro del coperchio della stessa scatola sia unito col centro della base della successiva, e così di seguito.

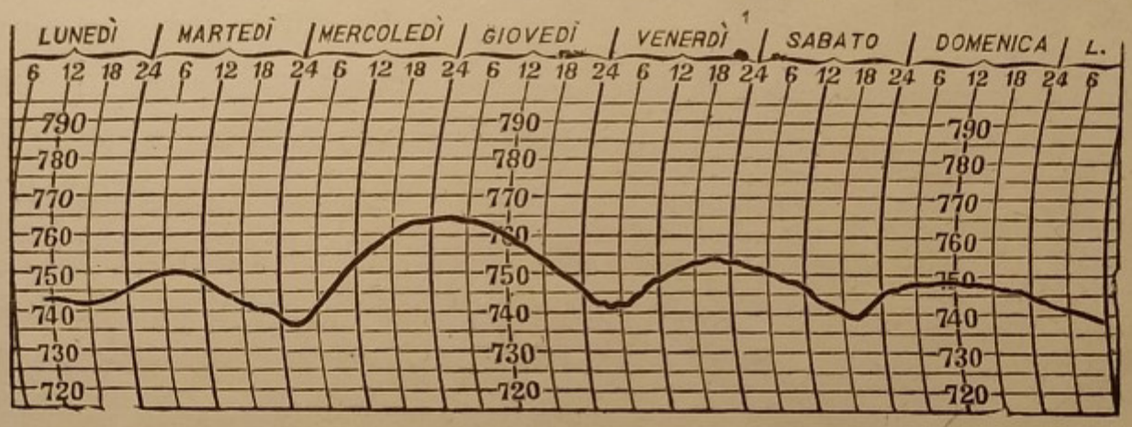


Fig. 148.

Con tale disposizione la somma delle flessioni delle singole scatole viene assunta dal centro del coperchio della scatola superiore e trasmessa con notevole amplificazione, mediante un sistema di leve, ed un indice. La estremità libera di questo porta un pennino carico d'inchiostro, reso poco evaporabile, coll'aggiunta di qualche po' di glicerina. Il pennino poggia sopra un foglio di carta quadrettata che ricopre un cilindro verticale a cui un meccanismo d'orologeria fa fare un giro in 24 ore in altro periodo di tempo a seconda delle diverse esigenze.

Si ottengono così dei diagrammi, come quello della fig. 148, che corrisponde a un'intera settimana.

62. Usi del barometro. — Per ricerche di laboratorio e per la Meteorologia, specialmente, l'uso del barometro è di estrema importanza. Al giorno d'oggi è anche largamente adoperato per la misura delle altezze nell'aeronavigazione.

La misura ha per base il fatto che la pressione barometrica diminuisce coll'altitudine, perchè gli strati d'aria che stanno

al disotto non premono sul barometro. Ma la densità dell'aria diminuisce coll'altezza, e quindi non esiste proporzionalità tra questa e la diminuzione dell'altezza barometrica. Per conseguenza la misura delle altezze col barometro è un'operazione complessa e può solo esser fatta mediante l'uso di formole costruite in base alla teoria e a risultati sperimentali, o mediante apposite tavole dette *tavole altimetriche*, compilate con lo stesso processo.

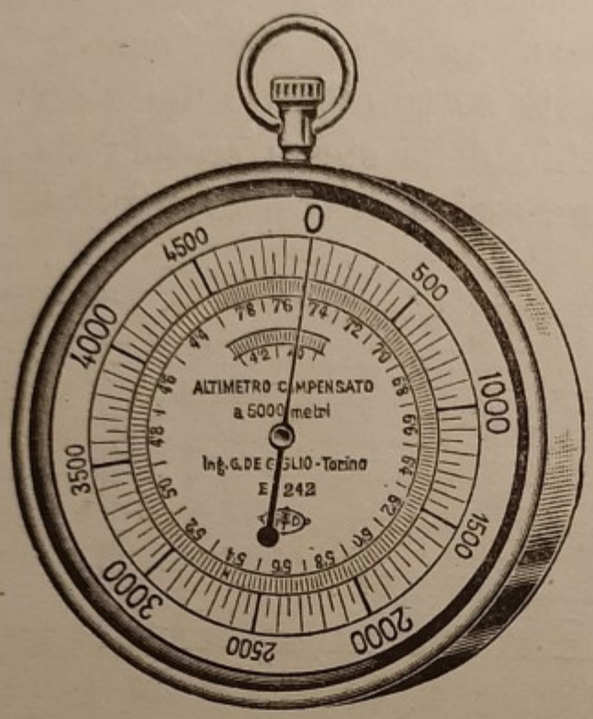


Fig. 149.

L'altimetria barometrica ha assunto una speciale importanza nella navigazione aerea. Un pilota, munito di un buon barometro metallico, potrebbe sempre calcolare l'altezza a cui si trova in un momento qualunque, ma per sottrarlo alla preoccupazione di calcoli che non potrebbe eseguire nelle condizioni in cui si trova, lo si fornisce di un *altimetro*, cioè di un comune barometro metallico, il quale oltre la graduazione della pressione in mm. porta l'indicazione delle altezze corrispondenti.

L'altimetro (fig. 149) porta due graduazioni: la prima è la solita, che dà la pressione atmosferica in centimetri di mercurio, l'altra indica l'altitudine in metri. Quest'ultima scala è segnata sopra un anello girevole attorno alla prima scala che è fissa, cosicchè l'aviatore alla partenza gira la scala mobile finchè la lancetta del barometro si trovi sul numero indicante la quota del punto di partenza.

63. Legge di Boyle e Mariotte. — Con semplici esperienze abbiamo provato che i gas sono assai compressibili (4).

Due Fisici, inglese l'uno, il Boyle, l'altro francese, il Mariotte, verso la fine del XVII secolo, indipendentemente l'uno dall'altro, fecero conoscere la legge della compressibilità dei gas, che porta il loro nome.

Una massa di gas che ha un volume V sotto una pressione p, assoggettata a pressioni $2p$, $3p$, ... assume dei volumi $\frac{V}{2}$, $\frac{V}{3}$, ... e dei volumi $2V$, $3V$, ... sotto le pressioni $\frac{p}{2}$, $\frac{p}{3}$, ...

Sicchè V e V_1 essendo i volumi di una massa di gas, alla stessa temperatura, sotto le pressioni p e p_1, si avrà:

$$V : V_1 = p_1 : p \quad \text{ossia } Vp = V_1 p_1 ; \qquad (1)$$

da ciò la legge:

A temperatura costante, i volumi d'una massa di gas sono inversamente proporzionali alle pressioni che sopporta; o ancora:

Il prodotto del volume d'una massa di gas per la pressione a cui è soggetta, è costante; inteso sempre che la temperatura rimanga fissa.

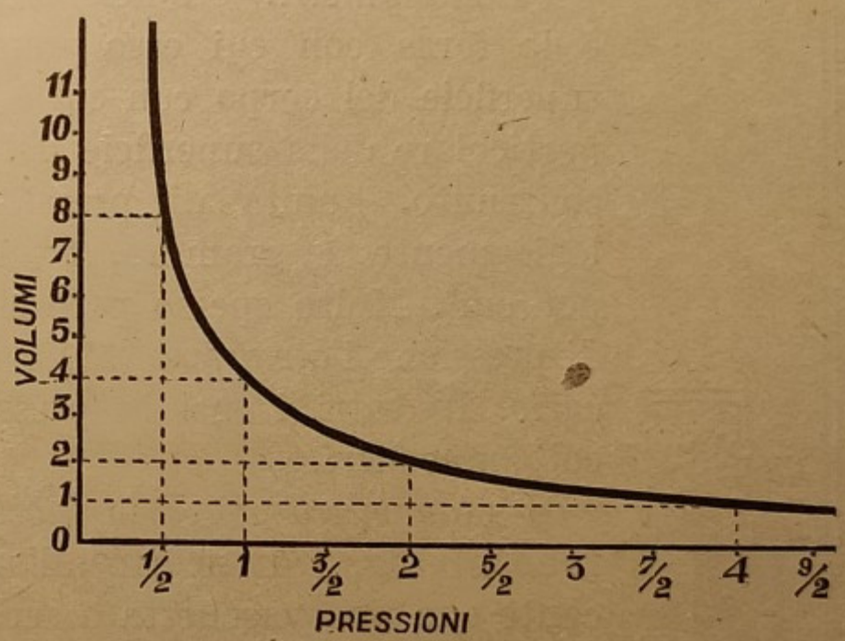


Fig. 150.

La legge di Boyle è evidentemente rappresentata graficamente dalla curva della fig. 150, nella quale sono contate in ascisse le pressioni e in ordinate i volumi; la curva è una iperbole.

Osservando poi che, a parità di massa, la densità di uno stesso corpo è inversamente proporzionale al volume (52), cioè

$$D : D_1 = V_1 : V,$$

nel caso che V e V_1 sieno i volumi di una stessa massa di gas alle pressioni p e p_1, si ha per la prima delle (1)

$$D : D_1 = p : p_1 ,$$

cioè *la densità di un gas, a temperatura costante, varia proporzionalmente alla pressione.*

Ricerche di precisione fatte da una schiera di Fisici eminenti (Despretz, Régnault, Natterer, Amagat, ecc.) hanno concluso che i diversi gas non seguono la stessa legge di compressibilità, e che non la segue nemmeno uno stesso gas in diverse condizioni di temperatura e di pressione. Tuttavia alcuni gas comuni, quali l'azoto, l'ossigeno, l'aria e l'idrogeno, per piccole variazioni di pressione e a temperature non molto distanti da zero seguono la legge di Boyle e Mariotte con discreta approssimazione.

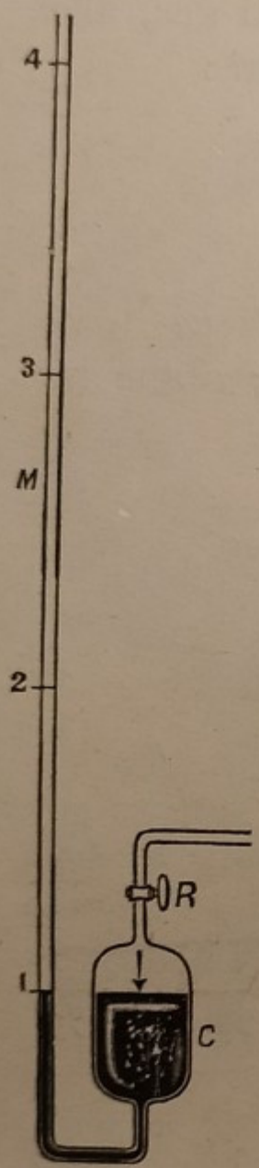


Fig. 151.

64. Manometri. — Poichè la pressione di un fluido è la forza con cui esso preme sopra 1 cm² della superficie del corpo con cui è a contatto, in modo particolare della superficie del recipiente in cui è contenuto, l'unità di pressione dovrebbe essere logicamente 1 grammo, 1 chilogrammo, 1 dina per cm². Molto spesso però si prende come unità di pressione l'*atmosfera* (57) o il *centimetro di mercurio*. In tutti i casi la pressione viene ottenuta coi *manometri*.

Il *manometro ad aria libera* è formato di un tubo M (fig. 151) aperto all'aria libera, e comunicante con una vaschetta o serbatoio C, contenente il liquido manometrico. La vaschetta è posta in comunicazione, mediante un tubo a robinetto R, col serbatoio dove c'è il fluido di cui si vuole misurare la pressione. Sia y l'altezza *verticale* a cui si innalza il liquido nel tubo al disopra del livello della vaschetta e indichiamo con H la pressione atmosferica, espressa in centimetri, del liquido che sta nel manometro. La pressione P cercata, espressa in centimetri, del liquido manometrico, è:

$$P = y + H.$$

Se il liquido usato è il mercurio, il dislivello è $y = 56^{cm}$ e il barometro indica una pressione $H = 76^{cm}$, la pressione del fluido è:

$$P = 76 + 56 = 132^{cm} \text{ di mercurio.}$$

O altrimenti, avuto riguardo alla formola $F = Shp$ del § 46 e ricordando che la pressione $P = \frac{F}{S}$, si ha: $P = hp$. Nel caso nostro è:

$$P = 132 \times 13{,}6 = 1795 \ gr. \ per \ cm^2$$

essendo il peso specifico del mercurio $p = 13{,}6$. E ancora, 1 atmosfera equivalendo a una colonna di mercurio di 76^{cm}:

$$P = \frac{132}{76} = 1{,}4 \ atmosfere.$$

Tale manometro però serve solo per pressioni di qualche atmosfera, in causa dell'altezza eccessiva che bisognerebbe dare al tubo per pressioni elevate.

Nel *manometro ad aria compressa* troviamo un tubo ad **U** (fig. 152), nel quale uno dei rami è chiuso e contiene una massa d'aria secca limitata, la cui pressione aumenta quando il suo volume diminuisce (63). Il secondo ramo del tubo è posto in comunicazione col serbatoio che contiene il fluido di cui si vuol misurare la pressione; nel gomito dei due tubi c'è del mercurio. Questo liquido sale nel ramo chiuso quando la pressione nel serbatoio aumenta; e quando l'equilibrio è raggiunto, la pressione cercata *è la somma della pressione dell'aria imprigionata nel ramo chiuso del manometro, e della pressione della colonna di mercurio compresa tra le superficie libere nei due rami.*

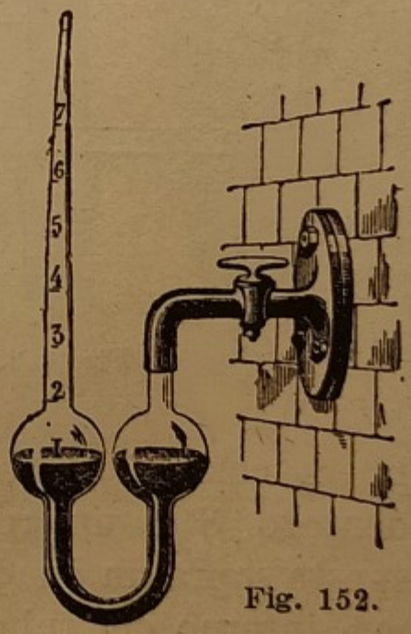


Fig. 152.

Il manometro ad aria compressa è graduato per confronto con un manometro campione.

Il funzionamento del *manometro metallico* è fondato sulla elasticità dei metalli, come avveniva nel barometro metallico (61). Il tipo Bourdon, che è il più in uso, si compone di un tubo *AB* (fig. 153), a pareti sottili di ottone, a sezione ellittica — per essere più deformabile — piegato ad anello. La estremità *A* del tubo, che è fissa, è posta in comunicazione, mediante un innesto a vite *V*, col serbatoio a pressione; l'altra estremità *B*, chiusa e

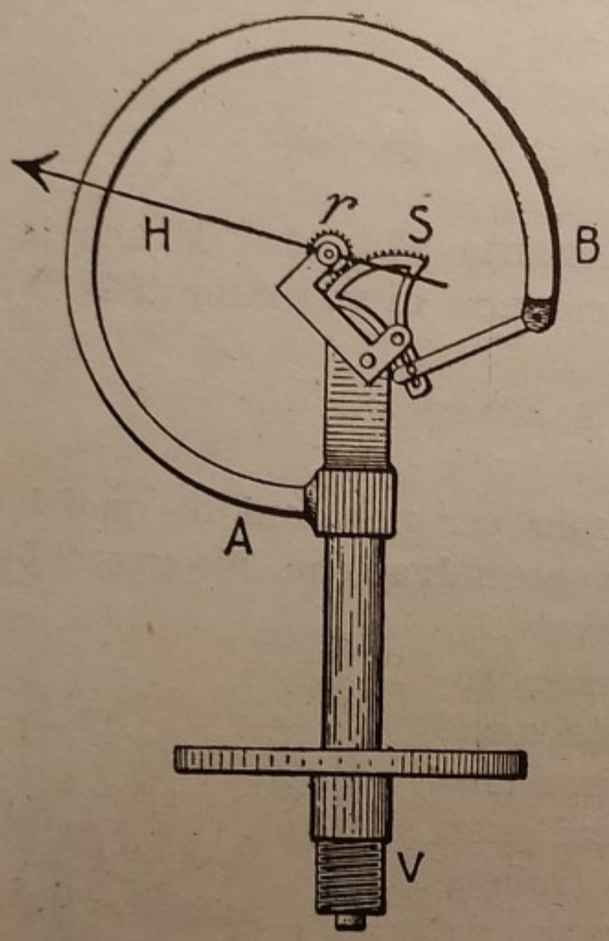


Fig. 153.

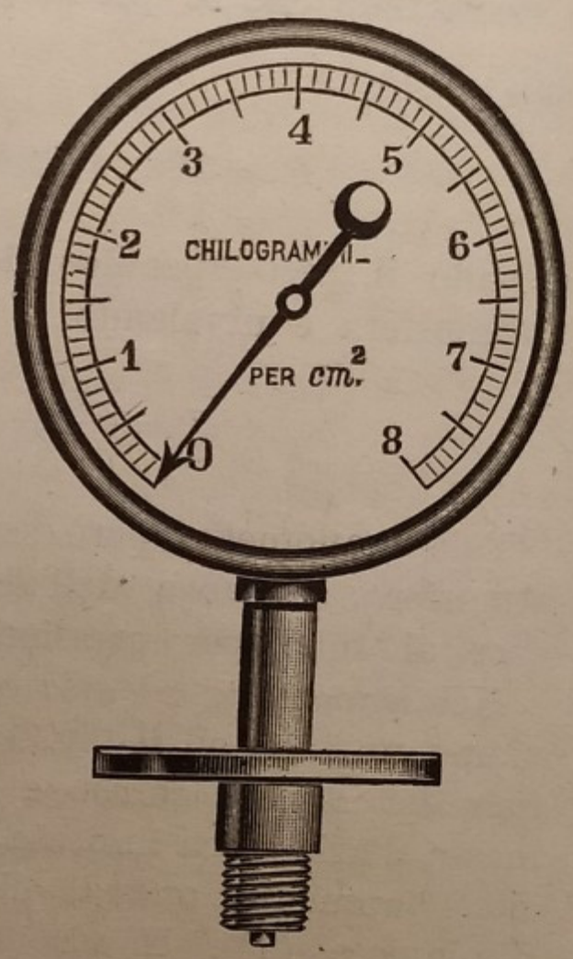


Fig. 154.

libera come il resto del tubo, comanda, mediante un settore dentato *S* e un rocchetto dentato *r*, un indice *H* che si sposta sopra un quadrante diviso. Quando la pressione aumenta nell'interno del tubo, l'estremità libera *B* si allontana dalla estremità fissa *A*, ciò che fa avanzare l'indice sulla graduazione; il contrario avviene quando la pressione diminuisce.

I manometri metallici sono graduati per confronto con un manometro campione, e dànno la pressione o in atmosfere o più spesso in chilogrammi per centimetro quadrato.

La fig. 154 rappresenta l'apparecchio nel suo aspetto esterno.

Pompe.

Il moto di un liquido può avvenire per effetto della gravità, come è il caso dell'acqua che scorre in un canale o in un fiume a letto inclinato, oppure per una differenza di pressione, che può avere origine naturale o artificiale.

Una differenza di pressione, è anche la causa che determina il movimento di un gas.

Il movimento di un fluido si ottiene particolarmente con le *pompe*, e cominceremo a descriverne una, detta *pompa universale*, perchè è il tipo di tutte le pompe a stantuffo.

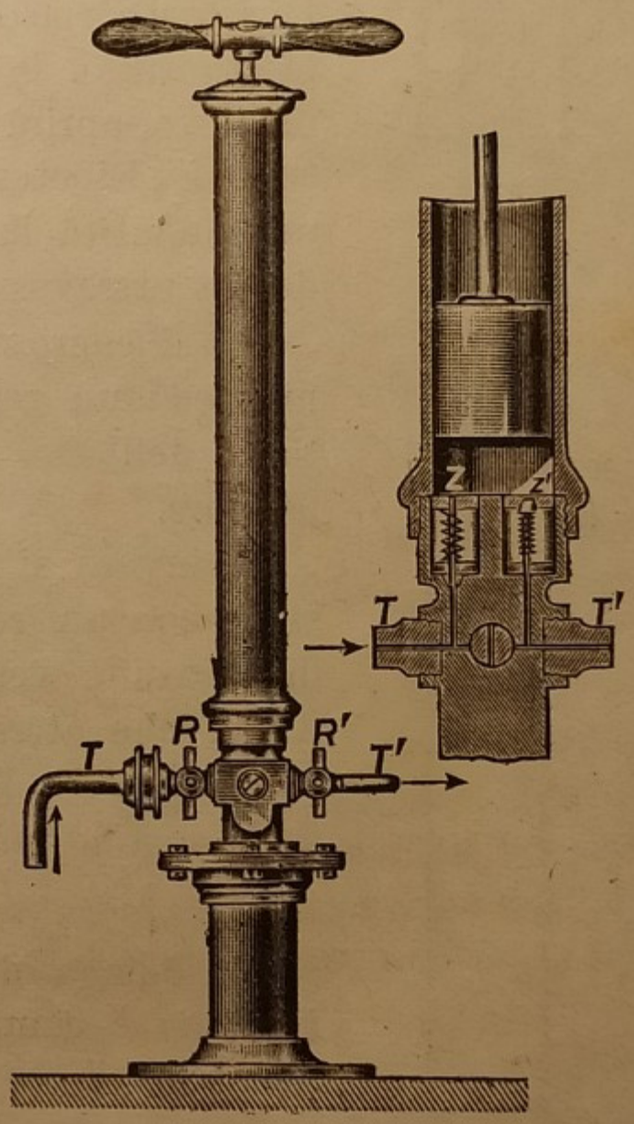


Fig. 155.

65. Pompa universale. — Entro un cilindro cavo (figura 155), detto *corpo di pompa*, si trova uno stantuffo unito ad un'asta che serve ad imprimergli un movimento di salita e di discesa. Il fondo del corpo di pompa ha due fori comunicanti coi due tubi T e T', muniti di *valvole coniche* Z e Z' tenute a posto da una leggera molla a spirale. La valvola Z si apre dall'esterno verso l'interno, la Z' invece si apre verso l'esterno. Sui tubi T e T' si trovano due robinetti R ed R'. Supponiamo che tali robinetti siano aperti e che lo

stantuffo tocchi il fondo del corpo di pompa. Per quanto accurata sia la costruzione dell'apparecchio, la base dello stantuffo e il fondo del corpo di pompa non combaceranno mai esattamente, ma rimarrà fra essi uno spazio libero, detto *spazio nocivo*, pieno d'aria. Alzando lo stantuffo, il volume di quest'aria aumenta, e quindi diminuisce di pressione, per conseguenza la valvola Z' poggerà anche più fortemente contro la sua sede, ma la valvola Z si aprirà per l'eccesso della pressione atmosferica e quindi pel tubo T entrerà dell'aria nel corpo di pompa. Spingendo poi in basso lo stantuffo, la pressione interna verrà ad aumentare, aprirà la valvola Z' e l'aria uscirà dal tubo T'. Ripetendo il gioco, potremo far passare una quantità indefinita d'aria da sinistra verso destra attraverso l'apparecchio.

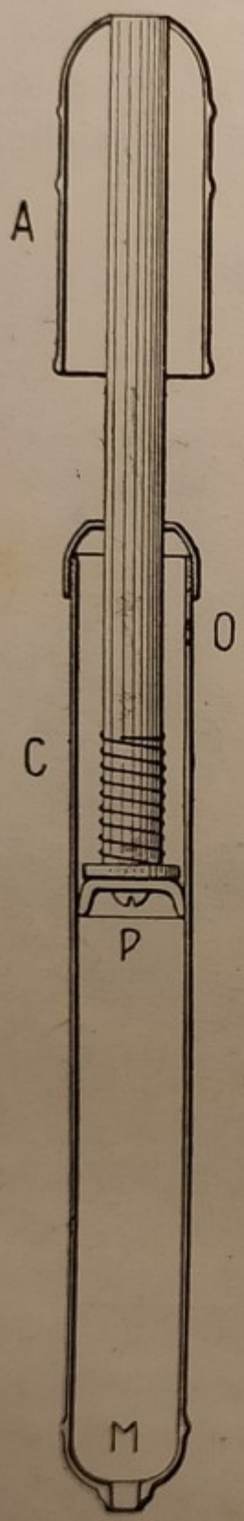


Fig. 156.

Or si comprende che se il tubo T' comunica con un recipiente chiuso, potremo iniettarvi dell'aria, e lo strumento agirà da *compressore*.

Se invece si mette il tubo T in comunicazione con un recipiente chiuso, ad ogni colpo di stantuffo verrà estratta una certa quantità d'aria che attraverso il tubo T' verrà spinta nell'atmosfera. In tal modo l'apparecchio agisce da *macchina pneumatica*.

66. Pompa da bicicletta. — La *pompa da bicicletta* è composta di un tubo metallico C, formante il corpo di pompa, e di uno stantuffo P, che è un semplice disco di cuoio col bordo piegato in basso e appoggiato contro le pareti del cilindro. L'asta dello stantuffo è unita in alto con una specie di scatola A che serve da manubrio e che copre una porzione del corpo di pompa, all'estremità superiore del quale si trova un piccolo foro O (fig. 156) che

permette l'entrata dell'aria. L'estremità inferiore porta un foro *M* con madrevite per potervi raccordare il tubo in caoutchouc che dall'altra parte si avvita alla valvola del pneumatico.

Supposto lo stantuffo all'estremo superiore del corpo di pompa, questo è pieno d'aria che viene compressa quando si fa discendere lo stantuffo impugnando il manubrio *A*; l'aria passa così nel pneumatico sollevandone la valvola che si apre dall'esterno verso l'interno e per tal ragione non potrà tornare indietro. Tirando in su lo stantuffo, al di sotto di questo si forma una rarefazione, per cui l'aria atmosferica, che entra per il foro *O*, preme sul bordo dello stantuffo e in qualche punto lo stacca dalla parete del cilindro aprendosi la via per passare sotto lo stantuffo. Abbassando nuovamente lo stantuffo anche quest'aria viene iniettata nel pneumatico, e così di seguito.

67. Macchina pneumatica. — La struttura di questa macchina, inventata nel 1650 da Ottone di Guericke, borgomastro di Magdeburgo, non è sostanzialmente diversa da quella della pompa ad aria descritta. Anche nella macchina pneumatica troviamo infatti un tubo cilindrico in cui è scorrevole uno stantuffo, ma le valvole hanno delle disposizioni speciali intese al miglior funzionamento della macchina. Lo stantuffo non è in questo caso *cieco*, ma è munito di una valvola *h*, collocata in una cavità interna, che si apre dall'interno del corpo di pompa verso l'esterno (fig. 157). L'altra valvola *I* in forma di tronco di cono, poggia contro l'orifizio conico del tubo che va al recipiente che si vuol vuotare, ed è comandata da un'asta *t* che passa a sfregamento forte attraverso lo stantuffo.

Molto spesso si accoppiano due corpi di pompa comunicanti con l'unico canale che va al recipiente. Il moto dei due stantuffi si ottiene mediante un unico manubrio a due impugnature che mette in moto una ruota dentata, la quale s'impegna contro le aste dentate degli stantuffi. In tal modo gli stantuffi eseguiscono delle corse opposte, e le pressioni che l'atmosfera esercita sulle basi superiori, si fanno in ogni momento

equilibrio. Invece con la macchina a un sol corpo, quando al disotto dello stantuffo si ha quasi il vuoto perfetto, per sollevarlo occorre applicarvi una forza equivalente a 1 kg. circa per cm² (57).

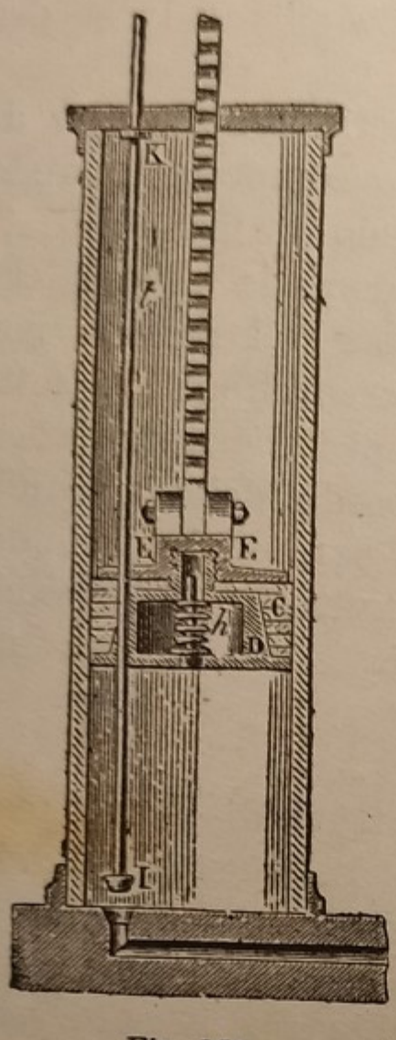


Fig. 157.

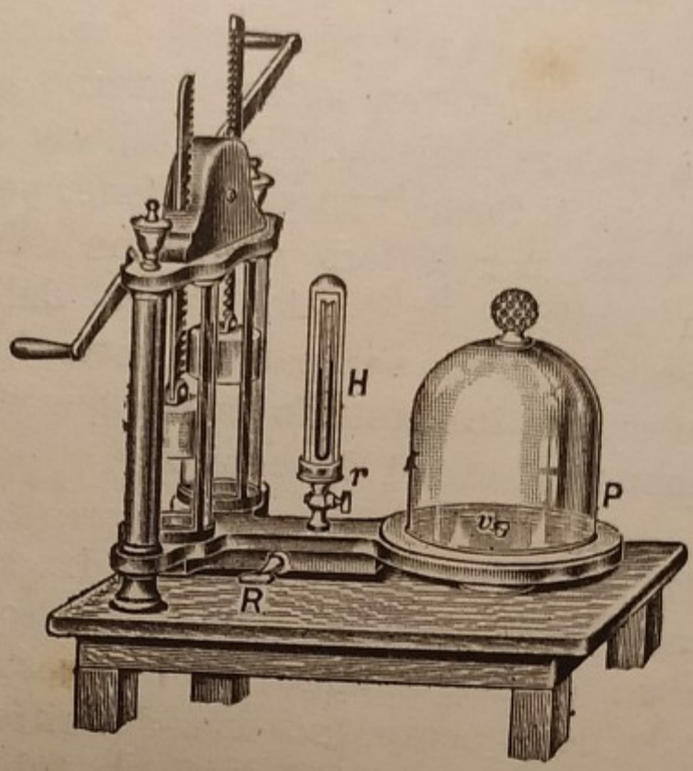


Fig. 158.

La figura 158 mostra la struttura della macchina pneumatica bicilindrica.

Qualunque sia il tipo della macchina, il canale comunicante coi corpi di pompa sbocca in *v* nel mezzo del piatto sul quale si appoggia la campana *P*, della quale si assicura la perfetta tenuta ungendone il bordo con qualche po' di sego.

Il *provino* serve a misurare il grado di vuoto ottenuto. Esso è una specie di piccolo barometro tronco, ossia un tubo ad **U** lungo da 15 a 30 centimetri, con uno dei rami aperto e l'altro chiuso ripieno di mercurio. Il tubo è fissato ad una tavoletta divisa in millimetri, ed è chiuso dentro una provetta che comunica col condotto della macchina (fig. 159). Prima che la macchina entri in azione il mercurio riempie tutto il ramo chiuso e arriva solo verso il basso del ramo aperto; la pressione ini-

ziale è infatti più che sufficiente a sostenere tale colonna di mercurio. Messa in azione la macchina, ad un certo momento, quando la diminuita pressione interna non è più capace di sostenere quella colonna, il mercurio si abbassa nel ramo chiuso e s'innalza nell'altro. Così potremo in ogni istante conoscere il valore della pressione interna, o, come si dice, il grado di rarefazione, esprimendola in *centimetri di mercurio* quant'è la differenza di livello misurata sulla scala divisa. Se si potesse estrarre tutta l'aria, la differenza di livello riescirebbe nulla; ma nel tipo di macchina descritto bisognerà accontentarsi quando la differenza di livello arriverà a qualche millimetro.

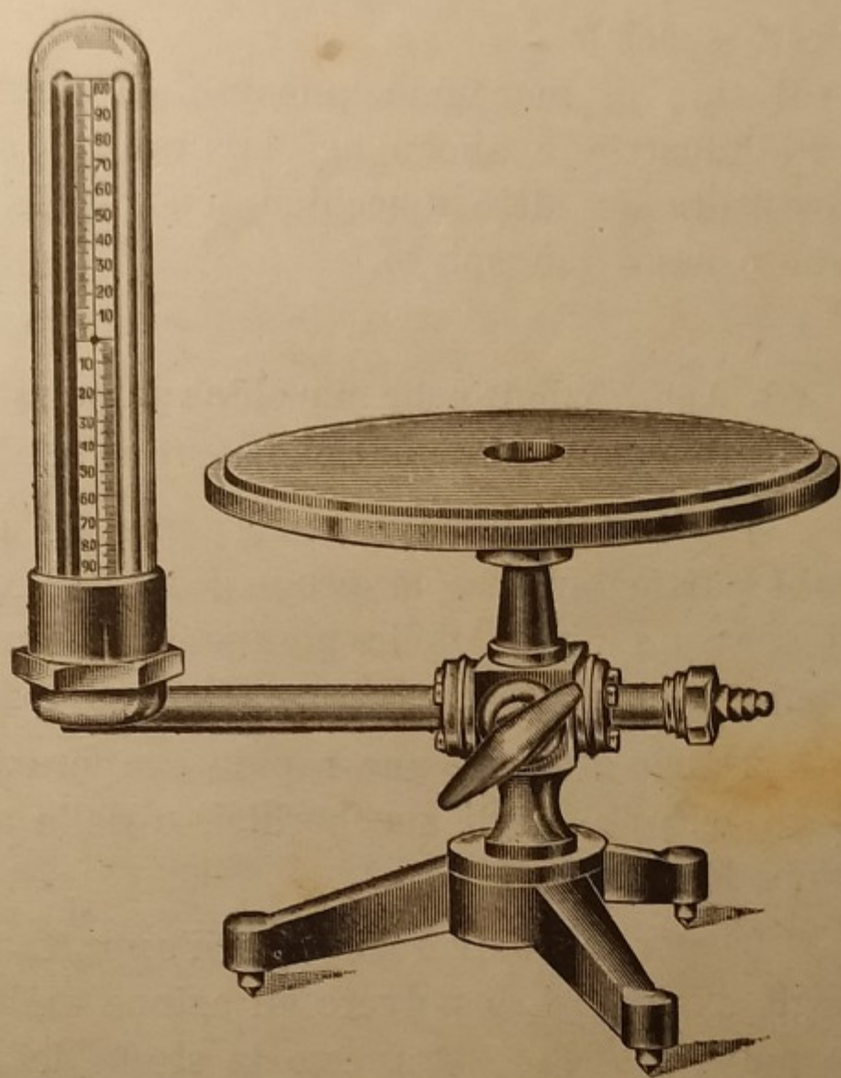


Fig. 159.

Il *piatto* della macchina è una spessa lastra circolare di vetro, fissata con ceralacca entro un piatto di bronzo, ben piana e ben smerigliata, il cui foro centrale comunica col condotto della macchina. La campana, che ha pure l'orlo inferiore ben piano e ben smerigliato, si appoggia semplicemente sul piatto dopo avere, come si disse, disteso qualche po' di sego sul suo bordo per ottenere una chiusura ermetica. Il foro centrale del piatto porta una filettatura che permette di avvitarvi dei particolari giunti, quando si vogliano vuotare dei recipienti di forme diverse. Fatto il vuoto, se si tratta di una campana, la pressione atmosferica la preme fortemente contro il piatto,

sì che, ad esperienza finita, non si riescirebbe a staccarnela. Per poterlo fare agevolmente e senza rischio di rottura della campana, vi si fa rientrare l'aria per mezzo di un robinetto speciale.

Il tipo di macchina pneumatica descritto non si usa più nell'industria e anche nei laboratori è oggi quasi del tutto sostituita da altre macchine più rapide e capaci di dare un vuoto assai più spinto.

68. Applicazione delle macchine pneumatiche e dei compressori. — Le macchine pneumatiche servono nell'industria a diversi usi:

1° per fare il vuoto nelle lampade ad incandescenza e in tubi particolari per la produzione dei raggi X; a tale scopo si usavano prima delle pompe a mercurio, ma oggi esclusivamente speciali pompe rotative ad azione rapidissima;

2° per ottenere una rapida evaporazione e concentrazione degli sciroppi negli zuccherifici, o delle conserve di frutta, di pomodoro, ecc.;

3° per la spolveratura degli appartamenti; esistono infatti degli aspiratori di polvere ad azione molto rapida che tolgono la polvere anche attraverso la stoffa dei mobili e dei tappeti, e la accumulano in sacchi speciali con gran vantaggio dell'igiene.

I compressori sono anche più largamente usati. Senza accennare ai mantici ed ai ventilatori per le fucine e per gli organi delle chiese, diremo che l'aria compressa in robusti serbatoi viene frequentemente utilizzata:

1° per il lancio dei siluri; il siluro stesso compie il suo percorso mosso da un motore ad aria compressa che ha nel suo corpo.

2° per produrre un getto violento di sabbia allo scopo di pulimentare pezzi metallici, di spulire o decorare il vetro, ecc.

3° I freni dei treni per viaggiatori e molti tram cittadini funzionano con l'aria compressa.

4° Nelle grandi città, e anche nei grandi uffici, poste, telegrafi, banche, ecc. si usa la posta pneumatica. A tale scopo

ci sono delle tubazioni metalliche di 6 o 7 cm. di diametro interno, nelle quali vengono poste delle scatole speciali, che richiamano per la loro forma i proiettili dei cannoni, le quali contengono le carte che si vogliono spedire da un luogo all'altro. La stazione di partenza lancia tali scatole immettendo nel tubo l'aria compressa di un serbatoio.

5° Per la liquefazione dei gas, come si dirà nella Termologia, si usano dei compressori.

6° L'aria compressa serve come forza motrice; è noto a tutti che nelle grandi gallerie delle nostre Alpi, a cominciare da quella del Cenisio, i fori delle mine vennero ottenuti con le perforatrici ad aria compressa, la quale servì anche a muovere i treni per lo sgombro del materiale scavato. Nelle officine sono in uso molti utensili ad aria compressa: magli, martelli, ecc.

69. Pompe idrauliche. — Servono particolarmente per sollevare un liquido o per travasarlo da un recipiente ad un altro.

La *pompa aspirante* (fig. 160) è formata di un largo tubo cilindrico con stantuffo. Questo porta uno o due fori passanti da parte a parte, chiusi da valvole che si aprono dal basso in alto; il corpo di pompa comunica mediante il *tubo d'aspirazione* con il serbatoio che contiene l'acqua da sollevare.

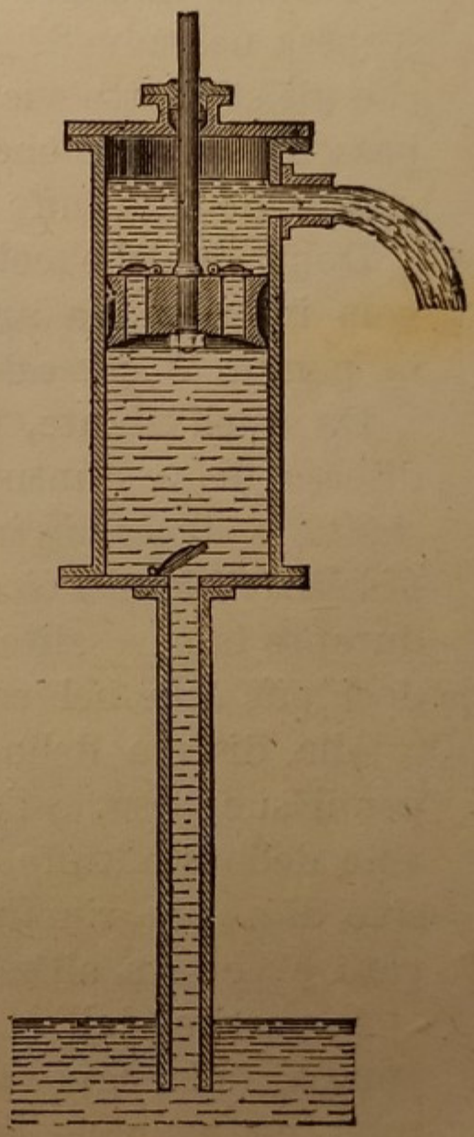


Fig. 160.

Alla sommità del tubo di aspirazione c'è una valvola che si apre dal basso in alto; un tubo di *efflusso*, munito talvolta di robinetto, è disposto lateralmente nella parte superiore del corpo di pompa.

La pompa funziona da principio come una macchina pneumatica. Prima di metterla in azione, lo stantuffo essendo *in basso*, l'acqua ha la stessa altezza nel tubo d'aspirazione e nel serbatoio. Sollevando lo stantuffo, al disotto di questo si forma

il vuoto; le valvole dello stantuffo restano chiuse per effetto del loro peso e della pressione atmosferica; la valvola inferiore si apre, spinta in su dall'aria del tubo d'aspirazione che ha da principio la pressione atmosferica: quest'aria entra nello spazio vuoto rimasto sotto lo stantuffo, e diminuisce di pressione perchè aumenta di volume. Una colonna d'acqua sale nel tubo, finchè la sua pressione aggiunta a quella dell'aria interna farà equilibrio alla pressione atmosferica che si esercita sopra la superficie libera del serbatoio.

Lo stantuffo essendo arrivato alla sommità della sua corsa, la valvola inferiore si chiude per il suo peso e l'acqua resta sospesa nel tubo di aspirazione. Abbassando lo stantuffo, l'aria che gli sta sotto viene compressa, finchè la sua pressione sorpasserà la pressione atmosferica tanto da sollevare le valvole dello stantuffo e sfuggire nell'atmosfera.

Dopo qualche colpo di stantuffo, l'acqua arriva alla valvola inferiore, la apre e penetra nel corpo di pompa. Allora la pompa è *adescata*.

Da quell'istante, continuando il moto regolare di salita e discesa dello stantuffo, ammesso che *la faccia inferiore dello stantuffo anche arrivato alla massima altezza, non si trovi a più di* $10^m,33$ *dal livello del serbatoio*, l'acqua segue lo stantuffo durante la sua salita e forma una colonna continua non essendoci più aria nel corpo di pompa.

Alla discesa dello stantuffo, la valvola inferiore si chiude per il suo peso, e l'acqua del corpo di pompa solleva le valvole dello stantuffo e vi passa sopra. Nel movimento successivo di ascesa, rimanendo chiuse le valvole, l'acqua viene sollevata e versata all'esterno dal tubo superiore.

A partire dall'istante in cui l'acqua riempie il corpo di pompa, ad ogni colpo di stantuffo, effluisce dal detto tubo un volume d'acqua uguale al volume del corpo di pompa.

Si tenga dunque presente che in una pompa aspirante l'acqua può salire solo ad un'altezza che faccia equilibrio alla pressione atmosferica che si esercita sull'acqua del serbatoio. Ciò è chiaro se si pensa che una pompa anche perfetta può al massimo produrre il vuoto perfetto sopra l'acqua che sta

nel tubo di aspirazione; in tal modo la pompa col suo tubo di aspirazione costituirebbe un vero e proprio barometro ad acqua. E poichè la pressione atmosferica normale fa equilibrio a una colonna di mercurio di 76^{cm}, fa identicamente equilibrio a una colonna d'acqua di $76 \times 13{,}59 = 1033^{cm}$ circa, tale è dunque l'altezza teorica a cui l'acqua può salire in una pompa aspirante.

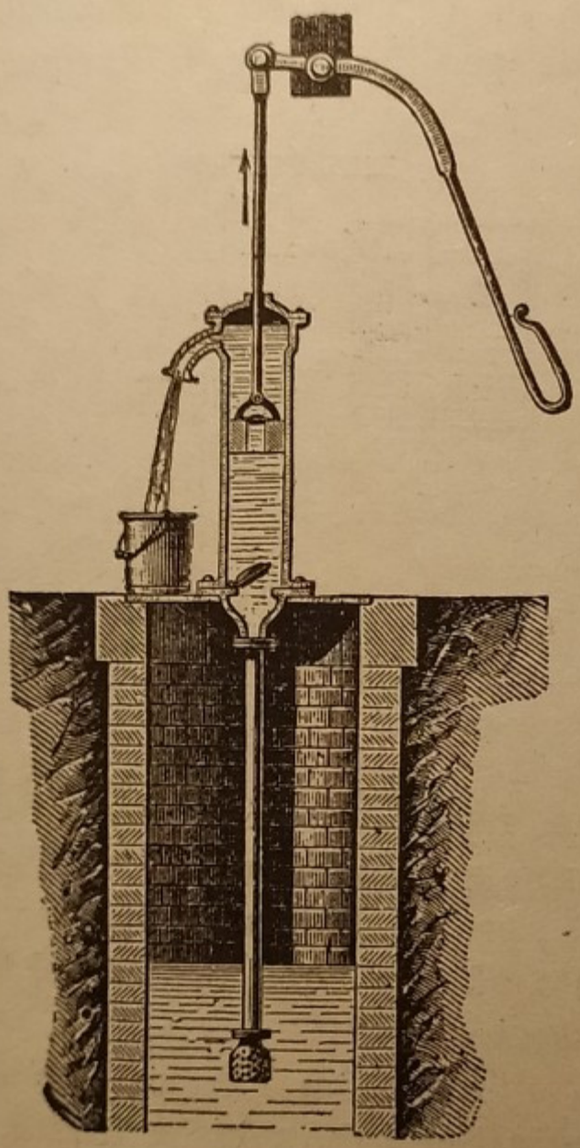


Fig. 161.

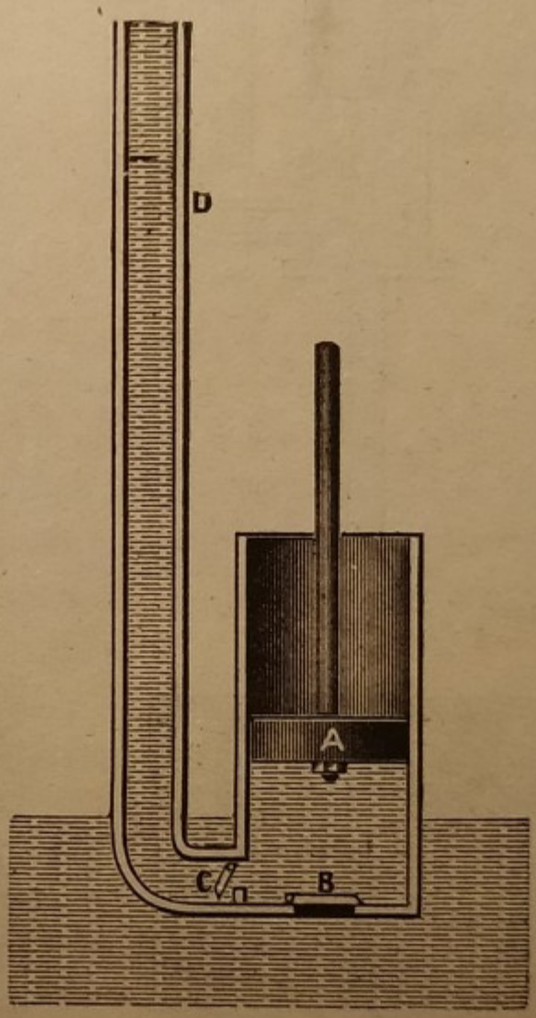


Fig. 162.

La pompa aspirante completa, come spesso viene usata per attingere l'acqua dai pozzi, è rappresentata nella figura 161.

Nella *pompa premente* non c'è tubo di aspirazione, poichè il corpo di pompa è *annegato*, cioè la valvola d'aspirazione è al disotto del pelo dell'acqua nel serbatoio. Il tubo per il quale l'acqua viene innalzata parte lateralmente dal basso del corpo

di pompa e porta ivi una valvola *c* aprentesi dall'interno verso l'esterno (fig. 162). Il pistone è *cieco*, cioè senza valvola, dimodochè, quando s'innalza, al di sotto di esso tende a formarsi il vuoto e quindi la pressione atmosferica e in parte anche la pressione idrostatica fa entrare l'acqua nel corpo di pompa. Quando lo stantuffo, arrivato in alto, si arresta, la valvola di aspirazione si chiude per il suo peso; l'acqua interna resta così isolata da quella esterna e all'abbassarsi dello stantuffo apre la valvola laterale e viene spinta ad una certa altezza nel tubo di ascesa.

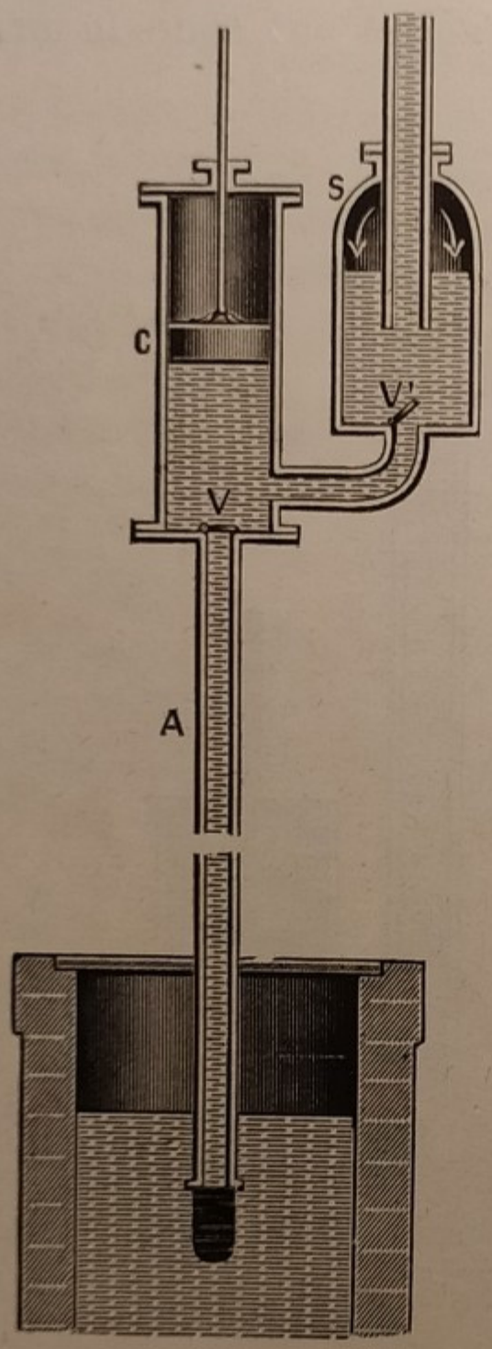


Fig. 163.

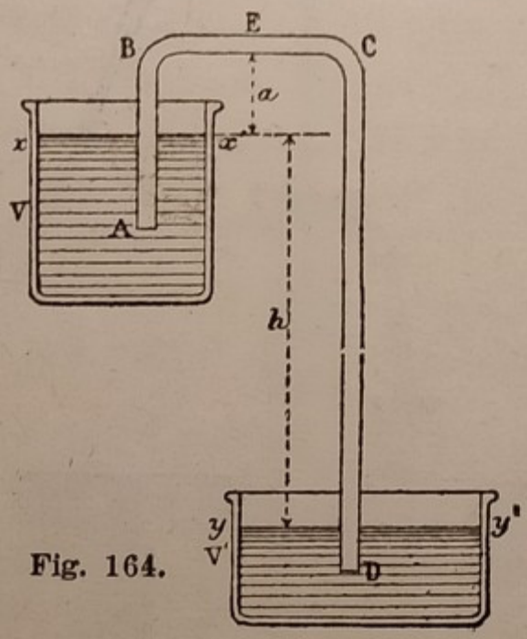


Fig. 164.

L'altezza a cui l'acqua può arrivare in tale tubo non ha limite, ma dipende solo dalla forza che si può esercitare sopra lo stantuffo nella sua discesa.

La figura 163 riproduce la *pompa aspirante e premente*, nella quale il corpo di pompa porta uno stantuffo cieco e un tubo di aspirazione che pesca nell'acqua del serbatoio, con la solita valvola di aspirazione sul fondo. Lateralmente, in basso, è innestato il tubo di ascesa con la rispettiva valvola, come si ha nella pompa premente (fig. 162).

In tal modo l'acqua entra nel corpo di pompa, come avveniva nella pompa aspirante e all'abbassarsi dello stantuffo viene fatta salire come nella pompa premente.

Fra gli apparecchi destinati a produrre il movimento di un liquido annoveriamo infine anche il *sifone*. È un tubo ricurvo ad U rovesciato con due rami di lunghezza diversa (fig. 164). Il recipiente V che si vuol vuotare è posto più in alto di quello V' che deve ricevere il liquido. Si fa pescare il ramo più corto nel recipiente più alto e l'altro in quello più basso; *adescato* il sifone, cioè riempitolo del liquido che si vuol travasare, si ha senz'altro il travasamento.

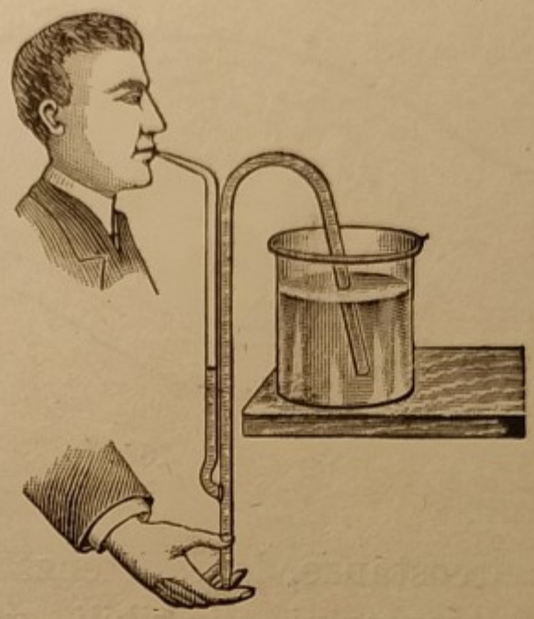


Fig. 165.

L'adescamento del sifone si fa spesso immergendo il ramo corto nel liquido da travasare e aspirando per l'altra estremità. Se il liquido è corrosivo, il sifone è munito di un tubo particolare per l'aspirazione (fig. 165).

70. Moto di un solido in un fluido (navi, dirigibili, velivoli). — L'aria e l'acqua oppongono una resistenza ai corpi che vi si muovono; la resistenza, per ragione della maggiore densità, è anche più grande nell'acqua. La esperienza inoltre ha dimostrato che quando un corpo si muove in un fluido si formano in questo dei filetti in movimento particolare; così nella figura 166 sono rappresentate le linee di corrente delle particelle fluide, provocate da una sfera S che si muove da A a B.

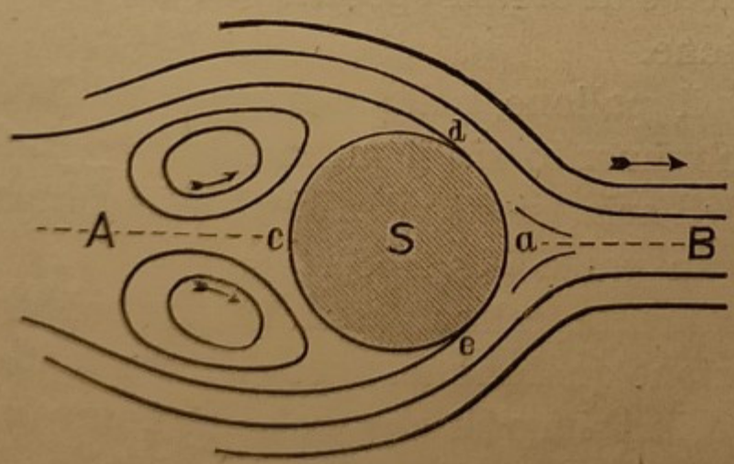


Fig. 166.

La figura 167 dà la forma di tali correnti intorno alla sezione di un'ala piana inclinata rispetto alla direzione del moto. In tutti i casi, dietro al corpo tende a formarsi un vuoto, da cui nascono dei movimenti vorticosi in quella regione. Ne segue che sulla parte anteriore del corpo si ha una pressione maggiore di quella posteriore e la differenza delle due pressioni è cagione della resistenza offerta dal fluido e ne dà la misura. Sui corpi oblunghi, a parità di altre circostanze, la resistenza è minore che sui corpi sferici. Navi, sottomarini, dirigibili, velivoli, le ali stesse di quest'ultimi hanno la forma che la natura ci ha indicata nei pesci. Gli apparecchi citati, le navi parzialmente immerse nell'acqua, i dirigibili e gli aeroplani nell'aria, hanno come organo propulsore una o più eliche mosse da potenti motori. Nelle grandi navi, in causa della grandissima resistenza offerta dall'acqua, i motori possono superare in potenza i 100 mila cavalli.

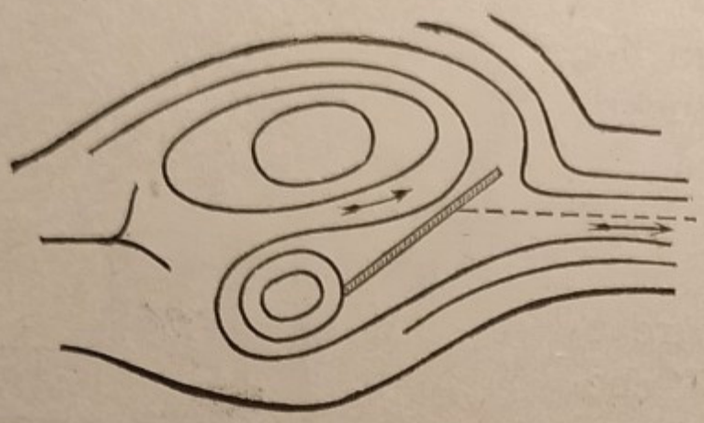


Fig. 167.

I dirigibili hanno un peso più o meno eguale alla spinta che ricevono dall'aria per il principio di Archimede; ma possono assumere per effetto dell'elica e di organi speciali — i timoni — un moto in qualsiasi direzione.

Quest'elica fa avanzare il pallone nella direzione dell'asse di rotazione, e perchè il movimento sia il meno possibile contrastato dalla resistenza dell'aria, si dà al dirigibile la forma allungata di un fuso o di un pesce (fig. 168).

L'aria però essendo raramente calma, affinchè il dirigibile possa muoversi in una direzione qualunque, anche contro vento, occorre che il motore possa imprimergli una velocità notevole; ma il problema non differisce meccanicamente da quello di una barca che, a forza di remi o di un motore, si muove sopra un corso d'acqua.

I dirigibili sono formati di un involucro esterno che avvolge una serie di palloni riempiti di idrogeno o di elio. Questo

ultimo gas ha un peso specifico circa doppio dell'idrogeno, ma ha il grande vantaggio su quest'ultimo di non essere combustibile, vantaggio enorme se si pensa al pericolo di incendio

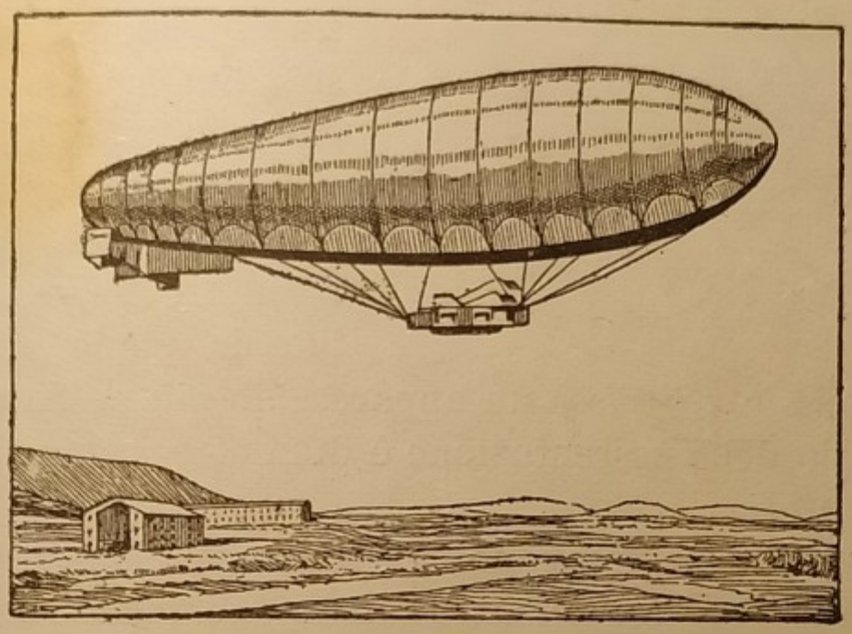


Fig. 168.

o di scoppio che presentano i palloni riempiti con idrogeno. L'elio è ora prodotto in grande quantità negli Stati Uniti d'America.

All'involucro, con sistemi più o meno rigidi, è unita la navicella allungata, che comprende i motori per le eliche, capaci di imprimere al dirigibile una velocità che può rendersi a volontà anche maggiore di quella del vento, nel caso che il dirigibile sia costretto a muoverglisi contro. A tale scopo il motore deve essere potente e nello stesso tempo leggero, in modo che non si richieda per sollevarlo una grande forza ascensionale e quindi involucri di grande cubatura, il che aumenterebbe enormemente la resistenza dell'aria.

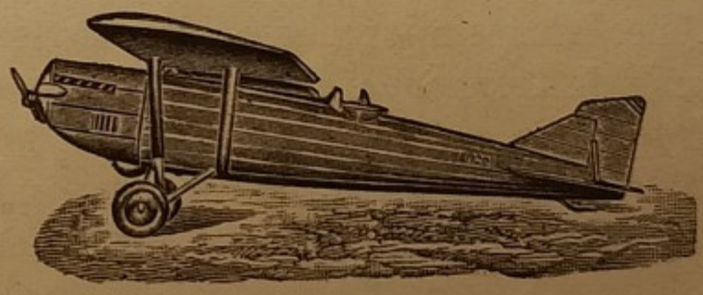


Fig. 169.

La mancanza di un motore leggero e potente ritardò per molto tempo la soluzione del problema della dirigibilità.

Nella navicella poi trovano posto diversi organi di comando, alcuni dei quali agiscono sui *timoni di direzione*, sul tipo di quelli delle navi, atti a orientare in piano orizzontale l'asse del dirigibile, e sui *timoni di profondità*, che son piani di tela girevoli intorno ad assi orizzontali, che servono a orientare l'asse del dirigibile in piano verticale.

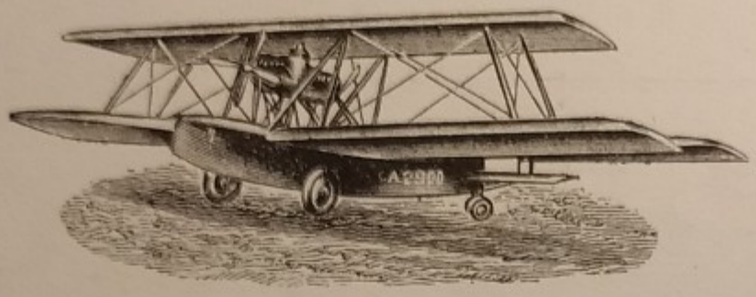


Fig. 170.

L'*aeroplano* o *velivolo* è un apparecchio più pesante dell'aria, e il principio della sostentazione è dinamico, come avviene nel cervo volante.

Un aeroplano si compone: 1° d'una intelaiatura di legno o di metallo leggero, detta *fusoliera*, che forma il corpo dell'apparecchio; 2° di due sistemi di timoni; 3° di grandi ali di tela, tese su armature fissate alla fusoliera, e formanti le *superficie sostentatrici*; 4° d'un motore che fa girare l'elica.

Si chiama *monoplano* (fig. 169) l'aeroplano che ha due sole ali disposte lateralmente l'una all'altra, come le ali di un uccello; il *biplano* (fig. 170) possiede due serie di ali sovrapposte.

Per prendere il volo l'apparecchio è montato su ruote, per solito due innanzi e una indietro più bassa; così poggia sul terreno. Messo in moto il motore, l'elica gira, e la forza motrice fa correre l'aeroplano sul suolo come fosse un'automobile. Contemporaneamente avviene che la *pressione dell'aria contro la superficie obliqua delle ali sostentatrici* aggiunge un movimento verticale a quello orizzontale, sicchè dopo un percorso di qualche decina di metri, la forza sostentatrice supera il peso e l'apparecchio s'innalza gradualmente.

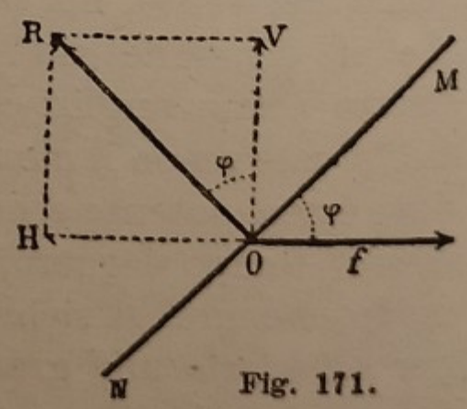


Fig. 171.

Quando il pilota arresta il motore, l'apparecchio discende per effetto del suo peso, cioè scivolando sull'aria con dolce pendenza fino ad atterrare.

Per comprendere il meccanismo della sostentazione possiamo riferirci alla figura 171.

Le ali sono in essa rappresentate dal segmento MN, inclinato sull'orizzonte di un angolo φ, e la forza propulsiva con cui agisce il motore è rappresentata da f. Così lo strato d'aria che è in contatto immediato con la faccia anteriore delle ali, si comprime, e in parte sfugge dai bordi delle ali stesse, in parte vi esercita contro una forza R perpendicolare applicata in un punto O, detto *centro di pressione*, situato al di sopra del centro di gravità. Scomponiamo la forza R in due, una H orizzontale e l'altra V verticale. La prima — *forza ritardatrice* — si oppone all'avanzamento, e la seconda — *forza sostentatrice* — tende a sollevare l'aeroplano, il che avviene quando la velocità di traslazione del medesimo ha raggiunto un conveniente valore.

In volo orizzontale la componente V è uguale al peso dell'apparecchio e la componente orizzontale H è eguale alla forza orizzontale f del propulsore; perchè ciò si verifichi la velocità dell'apparecchio deve mantenere un determinato valore. Se la velocità cresce, le forze suindicate crescono, in particolar modo la V supera il peso e l'apparecchio s'innalza; il contrario si verifica per una diminuzione della velocità.

Ad ogni modo anche qui, come nei dirigibili, la questione più importante risiede nell'uso di un motore potente e leggero; caratteristiche che finora sono possesedute soltanto dal motore a scoppio.

Diamo infine un cenno degli *aerostati*. Sono formati di un involucro contenente un gas più leggero dell'aria, e che possono innalzarsi in virtù del principio di Archimede. Un aerostato comprende tre parti principali: 1° il *pallone*, 2° la *navicella*, 3° la *rete* che riunisce insieme le due parti (fig. 172).

Il pallone è un sacco di stoffa di seta, d'ordinario sferico, ricoperto di vari strati di vernice impermeabile. Nella sua parte inferiore l'involucro porta un'apertura circolare, alla quale è unita una manica cilindrica di stoffa, formante un tubo per gonfiare il pallone. Si usa idrogeno o gas illuminante. Nella parte superiore trovasi una *valvola* comandata da una funicella che è a portata di mano dell'aeronauta.

La *navicella* è una cesta di vimini, destinata a contenere gli aeronauti e gli accessori: barometro, termometro, bussola, l'àncora d'arresto e la zavorra formata da sacchetti di sabbia. La navicella è sospesa al pallone mediante corde attaccate a una rete a larghe maglie, che avvolge l'emisfero superiore del pallone, e ne ripartisce la carica su tutta la superficie.

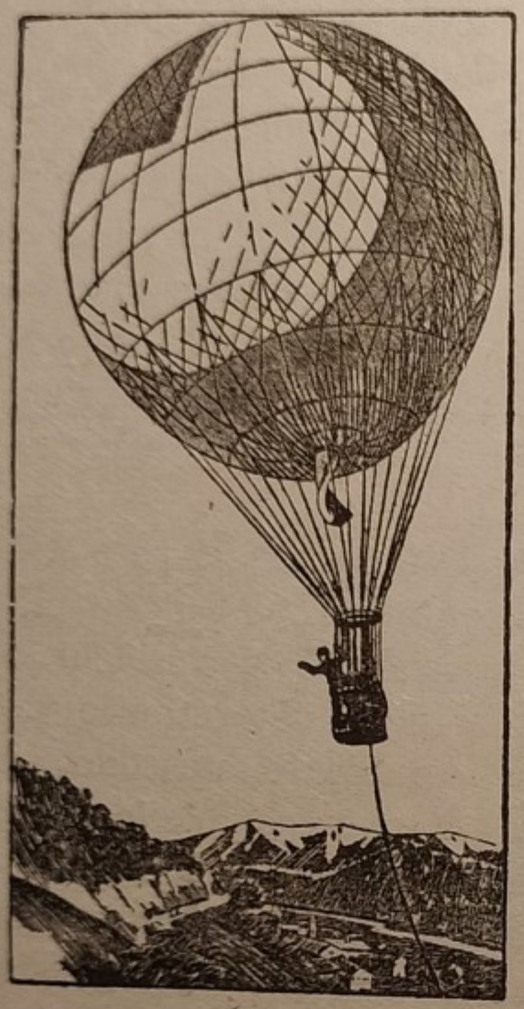


Fig. 172.

Ogni aerostato è soggetto a due forze: 1° il *peso* P, dell'involucro, del gas interno e della navicella col carico; 2° la *spinta* P', eguale al peso dell'aria spostata. La *forza ascensionale* è la differenza $P' - P$.

Si comprende che la forza ascensionale va diminuendo coll'altezza in causa della diminuita densità dell'aria, dimodochè quando il pallone ha raggiunto la zona di equilibrio, non s'innalza ulteriormente, e può essere soltanto trasportato orizzontalmente dal vento.

Per raggiungere una maggior altezza, l'aeronauta getta della zavorra; per moderare l'ascesa o per discendere, diminuisce la spinta, aprendo, per mezzo della fune che la comanda, la valvola che sta nella parte superiore del pallone. Con ciò del gas esce, il volume del pallone diminuisce e con esso diminuisce la spinta.

Una importante applicazione degli aerostati la abbiamo nei *palloni frenati*, detti anche *drachen* — palloni drago —. Essi sono tenuti prigionieri mediante un cavo di acciaio, ed hanno reso, durante l'ultima guerra, dei segnalati servizi di osservazione. L'osservatore, che sta nella navicella, domina col suo occhio il terreno che gli sta davanti, e rimane in continua comunicazione col suolo mediante il telefono. I palloni

sferici, che si usavano prima della guerra, resistono male ai forti venti che talora li abbattono e sempre imprimono loro delle oscillazioni dannose per le osservazioni, perciò si è dato

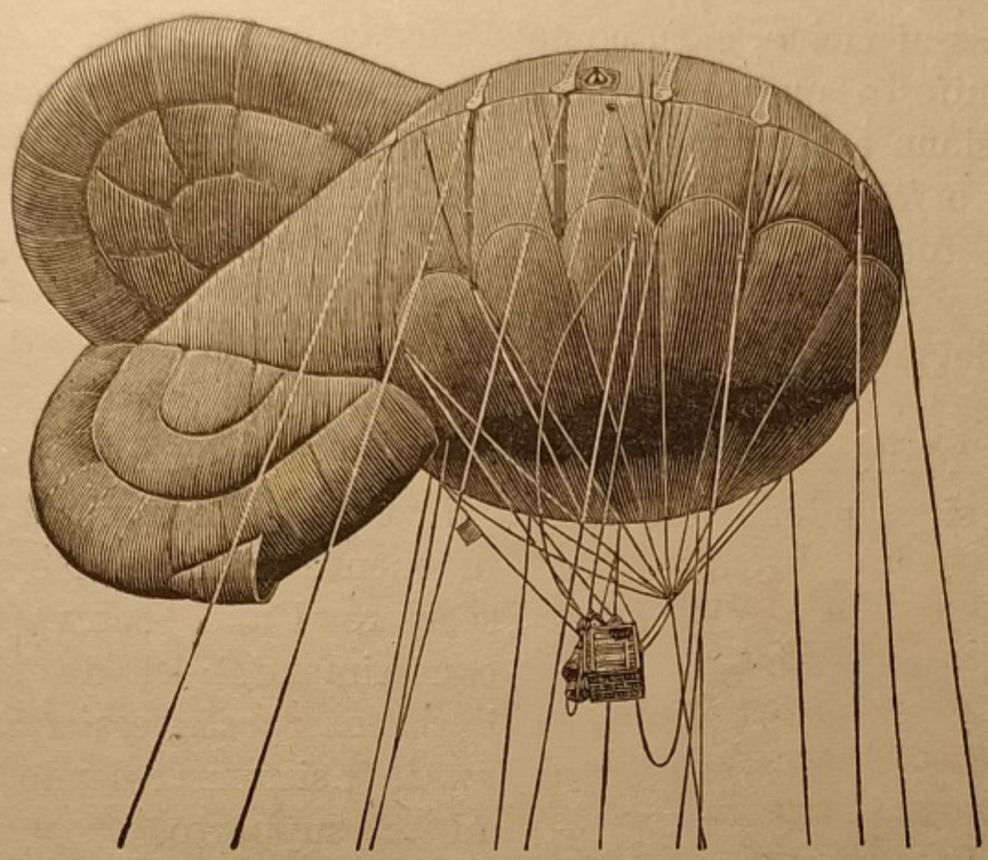


Fig. 173.

a tali apparecchi delle strane forme che alla prova si sono dimostrate meno mobili, condizione favorevole per l'esattezza delle osservazioni (fig. 173).

Azioni molecolari.

71. Coesione e adesione. — Si ammette che fra le molecole dei corpi si eserciti una mutua attrazione, detta *coesione*, che, molto grande nei solidi, è debole nei liquidi e debolissima nei gas. La coesione è una forza che si oppone all'allontanamento delle molecole, e ciò appare manifesto anche in molti fatti comuni, come nelle goccie che rimangono sospese alle foglie degli alberi, e nelle goccie d'acqua che rotolano sopra un pavi-

mento polveroso, o in quelle di mercurio posate sopra una lastra di vetro, che conservano la forma sferoidale, quantunque sollecitate dalla gravità.

Oltre a ciò, tra le molecole di un corpo e quelle di un altro poste assai vicine, cioè, come si dice comunemente, a contatto, si manifesta pure una mutua attrazione, detta *adesione*.

Coesione e adesione vengono chiamate forze o *azioni molecolari*, e *fenomeni molecolari* quelli che ne derivano.

Tali forze producono effetti sensibili soltanto a distanze piccolissime, circa 1 micron, ma si manifestano con una intensità rilevante.

72. Adesione fra solidi, fra solidi e gas e fra solidi e liquidi. — Se si prendono due dischi di vetro perfettamente piani e finemente smerigliati e si fanno scorrere l'uno contro l'altro, comprimendoli sì da scacciare l'aria interposta, essi rimangono uniti. Il sistema essendo sospeso ad un supporto, occorre applicare un peso *P* abbastanza rilevante per separarli (fig. 174). L'esperienza riesce egualmente nel vuoto, perchè la loro aderenza non deriva dalla pressione atmosferica.

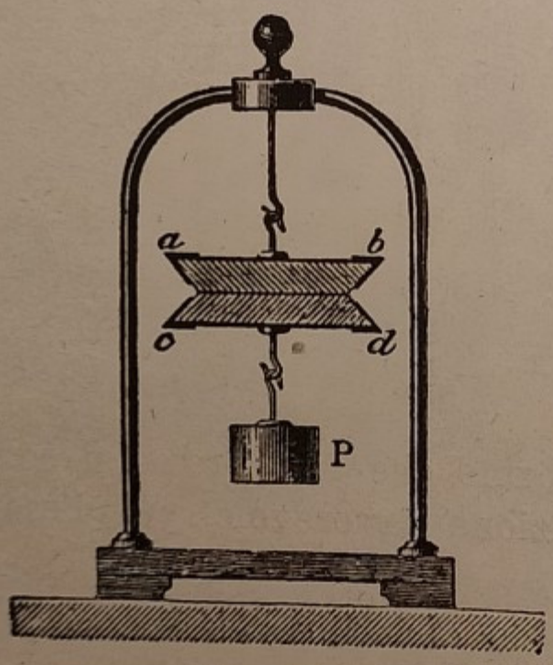


Fig. 174.

L'adesione fra solidi è provata anche da questo fatto: se si passano al laminatoio una lamina d'oro e una d'argento sovrapposte, le superficie della duplice lamina restano fortemente unite come se fossero saldate.

La tintura delle stoffe, delle pelli, ecc., è una operazione che *modifica la tinta* per effetto d'una *adesione meccanica* della materia colorante, le particelle della quale attaccate alle fibre possono non venire asportate colla lavatura.

L'*adesione fra solidi e gas* è provata dal fatto che solidi porosi, quali il carbone di legno, assorbono una grande quantità di gas e lo trattengono imprigionato nei loro pori.

La *spugna di platino* assorbe una notevole quantità d'idrogeno e lo sviluppo di calore dovuto alla diminuzione di volume del gas assorbito, fa arroventare la spugna, sì che l'idrogeno può esserne acceso. Tal principio veniva utilizzato in certi accendilume che furono in voga prima della scoperta dei fiammiferi.

Per provare l'*adesione fra solidi e liquidi* si equilibra un disco di vetro, sospeso sotto un piatto della bilancia idrostatica, e lo si mette a contatto con la superficie libera dell'acqua posta in un bicchiere sottostante. Il disco aderisce contro la superficie liquida, sì che occorre caricare alcuni pesi sull'altro piatto per staccarlo. Il fenomeno si riscontra anche se il liquido non bagna il disco, com'è il caso del mercurio.

Una bacchetta di vetro immersa nell'acqua ed estrattala, porta con sè sospesa una goccia liquida all'estremità inferiore. Il liquido che tocca direttamente il vetro vi aderisce, il resto rimane sospeso per la coesione del liquido.

73. Diffusione, osmosi, dialisi. — Disponendo l'un sopra l'altro due liquidi *miscibili*, ad esempio, dell'alcool sopra l'acqua, i due liquidi penetrano lentamente l'uno nell'altro per *diffusione*. L'esperienza, meglio che coll'acqua e l'alcool, si può eseguire facendo arrivare sul fondo di una provetta contenente dell'acqua, mediante una pipetta, una soluzione di solfato di rame. Malgrado che tale soluzione sia più densa dell'acqua, si osserva che lentamente la colorazione azzurra si innalza progressivamente.

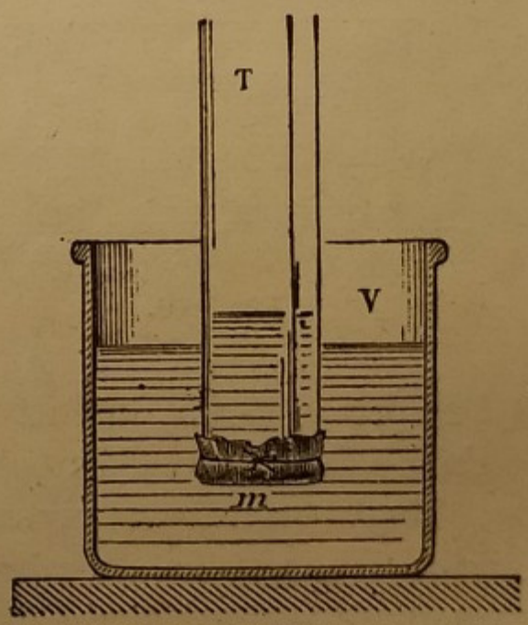


Fig. 175.

Quando due liquidi miscibili siano separati da una membrana che venga bagnata da almeno uno dei liquidi, essi si diffondono attraverso la membrana stessa. Per fare l'esperienza si chiude l'orifizio inferiore di un tubo di vetro *T* con una membrana *m*, ad esempio, con un pezzo di vescica animale, e si versa nel tubo dell'acqua zuccherata. Il tubo *T* s'im-

merge in un vaso V contenente acqua pura (fig. 175), in modo che i due liquidi si trovino alla stessa altezza; dopo qualche tempo si vedrà che il liquido si innalza nel tubo T e l'acqua esterna apparisce dolce. Ciò dimostra che l'acqua zuccherata passa fuori — *esosmosi* — e dell'acqua esterna attraversa la membrana in senso opposto — *endosmosi* —. La velocità dell'endosmosi dell'acqua è superiore a quella dell'esosmosi dell'acqua zuccherata. L'apparecchio si chiama *endosmometro*.

Se poi si rinnova in modo continuo l'acqua esterna, tutto lo zucchero esce dal tubo T, e il livello del liquido nell'interno di questo s'abbassa man mano che la concentrazione dell'acqua zuccherata diminuisce; e si arriva all'eguaglianza dei due livelli quando i liquidi dalle due parti della membrana assumono la stessa composizione.

I corpi che attraversano più veloci una membrana sono le sostanze cristallizzabili o *cristallòidi*. Le sostanze dette *collòidi*, quali la colla, l'albumina, la gelatina, e simili, vi passano assai lentamente. Su tal fatto è fondata la *diàlisi*, che si opera mediante il *dializzatore* (fig. 176). In un vaso di vetro v, il cui fondo p è di *carta pergamenata*, si versa una mescolanza di una sostanza cristalloide e di una colloide, ad esempio, zucchero e gomma arabica, sciolte in acqua.

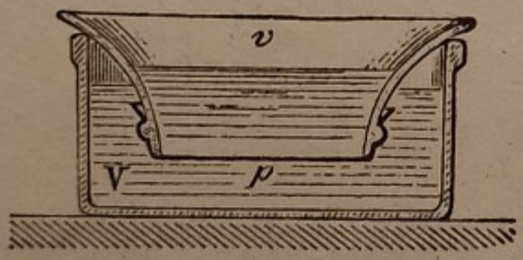


Fig. 176.

Questo vaso lo si immerge in un altro V contenente acqua pura. Lo zucchero passa attraverso la membrana e resta disciolto nell'acqua esterna, mentre il colloide non passa. Rinnovando l'acqua del vaso V tutto il cristalloide viene asportato.

Negli organismi viventi si trovano spesso dei liquidi miscibili, separati da membrane che sono bagnate, e però i fenomeni di osmosi si incontrano frequenti e hanno una notevole importanza nei processi di assimilazione e di eliminazione.

74. Fenomeni di capillarità. — I fenomeni di adesione fra solidi e liquidi portano a delle eccezioni alle leggi dell'Idrostatica.

Nell'Idrostatica abbiamo visto che un liquido presenta i seguenti caratteri: 1° non ha forma propria; 2° la sua superficie libera è orizzontale; 3° si dispone alla stessa altezza in più vasi comunicanti.

Queste leggi però sono state da noi formulate nell'ipotesi che le molecole del liquido sieno soggette soltanto alla gravità; mentre nei fenomeni che ci accingiamo a esaminare, oltre la gravità, intervengono anche la coesione e l'adesione; perciò si riscontra che una goccia di mercurio, posata sopra una lastra di vetro pulita, prende una forma che è tanto più vicina alla forma sferica quanto è più piccola.

In un bicchiere comune contenente dell'acqua la superficie libera è per la massima parte piana e orizzontale, ma, se ben si osserva, vicino alle pareti mostra un accentuato innalzamento (fig. 177).

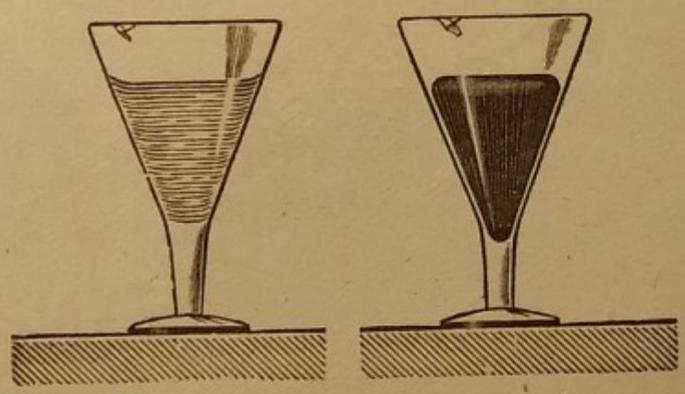


Fig. 177. Fig. 178.

Il mercurio invece, posto in un vaso di vetro, presenta ancora nel mezzo una superficie orizzontale, ma vicino alle pareti mostra un abbassamento (figura 178). Così in un tubo di vetro piuttosto stretto, immerso parzialmente in un liquido, si manifesta una superficie libera concava, detta *menisco con-*

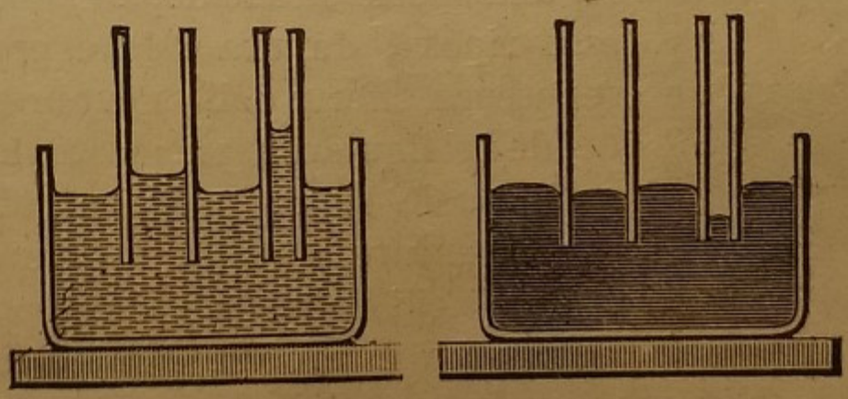


Fig. 179. Fig. 180.

cavo, se il liquido *bagna* il tubo, e nell'interno di questo il liquido si trova *sollevato* sopra il livello esterno (fig. 179).

Se il liquido *non bagna* il tubo, si ha un *menisco convesso* e il livello interno si trova *più basso* del livello esterno (fig. 180). La differenza di livello resta inalterata nel vuoto, ciò che esclude l'influenza della pressione atmosferica.

Nell'un caso o nell'altro è verificata la seguente *legge di Jurin: la differenza di livello varia in ragione inversa del diametro del tubo*, il diametro essendo misurato all'altezza del menisco.

I fenomeni descritti hanno il loro fondamento in ciò che *lo strato superficiale di ogni liquido si comporta come una membrana elastica e contrattile*, tesa sopra il liquido.

Degli aghi da cucire, posati con precauzione sulla superficie dell'acqua, restano galleggianti (fig. 181). Per la stessa

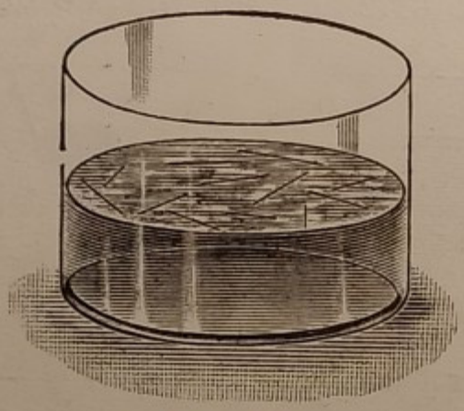


Fig. 181.

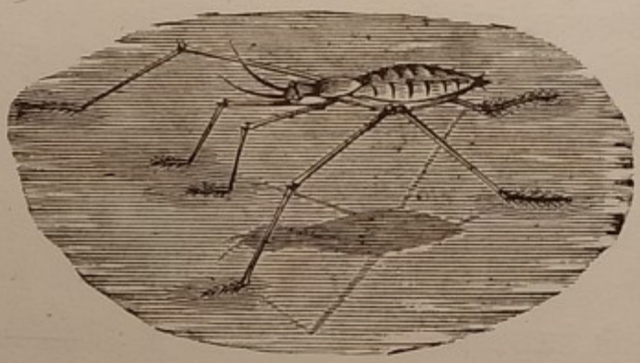


Fig. 182.

ragione un insetto, chiamato idrometra, può passeggiare sulla superficie degli stagni (fig. 182).

Ciò avviene perchè al disotto dell'oggetto galleggiante si forma una depressione, una specie di bacino, sul fondo del quale esso riposa, dovuta tale depressione alla resistenza offerta dalla membranella superficiale del liquido, come mostra la figura 183, nella quale l'ago da cucire galleggiante è rappresentato in sezione trasversale.

Fig. 183.

Con facili esperienze si possono produrre delle vere e proprie lamine liquide assimilabili ad esilissime membrane solide, estendibili ed elastiche, come fossero dei sottilissimi fogli di gomma elastica.

Un anello di filo di ferro, estratto dall'acqua saponata dove era immerso, si trova occupato da una lamina, attaccata tutt'intorno all'anello, piana finchè è lasciata a sè, ma che assume la

forma di una borsa soffiandovi dentro (fig. 184); e che ritorna subito piana cessando di soffiare.

Se si lega a due punti dell'anello (fig. 185) un filo flessibile e poi si distrugge la lamina da una parte del filo, la porzione

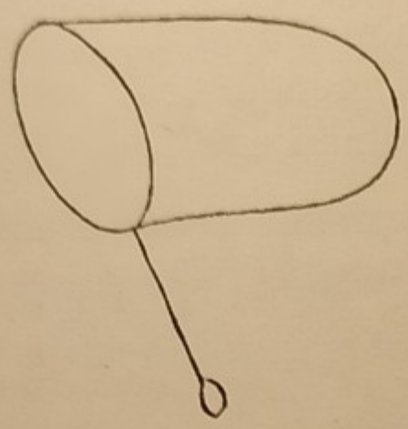


Fig. 184.

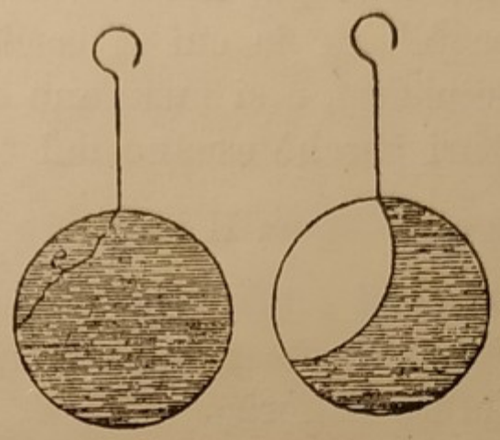


Fig. 185.

rimasta intatta si contrae assumendo, per quanto le permettono i legami a cui aderisce, la minima superficie possibile, e si vedrà il filo assumere la forma di un arco di cerchio; se poi il filo è chiuso su se stesso, assume la forma di una circonferenza, dopo rotta la lamina che vi era compresa (fig. 186).

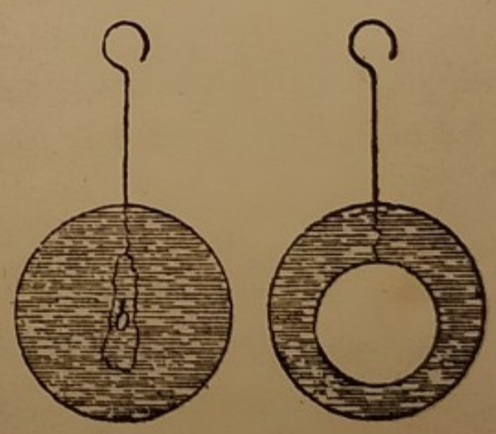


Fig. 186.

Queste esperienze mostrano la tendenza che hanno le lamine liquide a contrarsi, cioè ad occupare la minima superficie compatibile coi legami loro imposti, che nelle prove citate sono rappresentati dall'adesione che obbliga il liquido a rimanere in contatto coi fili.

75. Viscosità. — Quando un liquido si muove in un tubo piuttosto largo, il suo moto è ostacolato solo dall'attrito esistente fra le pareti del tubo e i filetti liquidi che vi strisciano contro. Ma se il tubo è stretto, il moto è ostacolato anche dalla resistenza che un filetto liquido trova a muoversi a contatto coi filetti che lo circondano. Questa resistenza è nota sotto il nome di *attrito interno* o *viscosità*. Perciò avviene che la

velocità, nulla per i filetti a contatto immediato con le pareti, va aumentando col diminuire della distanza dall'asse del tubo. La viscosità varia da liquido a liquido e diminuisce col crescere della temperatura. Di solito la si misura confrontandola con quelle dell'acqua. Il *viscosimetro* più semplice è formato di un tubo capillare da cui si lascia effluire il liquido contenuto in un recipiente, e si misurano con un cronometro i tempi T e t necessari perchè escano dal tubo volumi eguali del liquido in esame e di acqua. Il rapporto $\frac{T}{t}$ si prende come misura della viscosità del liquido in relazione all'acqua. Un liquido molto vischioso è la glicerina per la quale tal rapporto è eguale a 4000; per l'etere solforico è 0,26.

TERMOLOGIA

La *Termologia* studia i fenomeni dovuti al calore.

Misura delle temperature.

76. Calore e temperatura. — Il calore è qualche cosa che ha una esistenza obbiettiva e che passando da un corpo ad un altro può produrre svariati effetti.

La *temperatura* è invece una *qualità* dei corpi caldi; un corpo caldo, in contatto con un corpo freddo, cede ad esso calore; si dice che il primo ha *temperatura più alta* del secondo; e quando il passaggio di calore non ha luogo i due corpi si dicono alla *stessa temperatura.*

Non bisogna però confondere la temperatura con il calore posseduto dal corpo; solo per due corpi di egual peso e di egual natura, la maggiore o minore temperatura corrisponde a una maggiore o minore quantità di calore posseduta.

Un ago che può esser arroventato tenendolo per pochi secondi immerso nella fiamma di una candela, e che ha perciò una piccola quantità di calore, gettato in una pentola d'acqua in ebollizione cede all'acqua del proprio calore, sebbene l'acqua ne possieda una quantità assai maggiore.

77. Termometri e scale termometriche. — Il tatto non è giudice esatto nè troppo sensibile per apprezzare la temperatura dei corpi, perciò si è ricorso a degli indicatori fisici, detti *termometri*, i più comuni dei quali si fondano sulla dilatazione prodotta nei corpi dal calore.

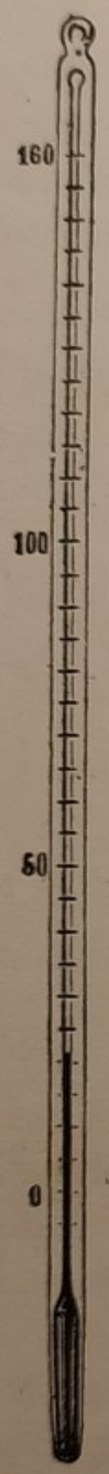


Fig. 187.

Il principio del termometro comune è fondato sulla seguente convenzione di *ritenere eguali due variazioni di temperatura che producono due variazioni eguali nel volume di un medesimo corpo*; la misura di una variazione di temperatura si riduce alla misura della variazione del volume di un corpo che si giudichi adatto allo scopo.

Il termometro comune (figura 187) è formato di un palloncino o bulbo di vetro, saldato a un cannello sottile, sul quale si valutano le dilatazioni del liquido, che è ordinariamente il mercurio.

Ogni termometro è graduato, ossia porta direttamente sul cannello, o sopra una tavoletta alla quale è unito, delle divisioni numerate dette *gradi*, e si conoscono vari tipi di graduazione, ossia si hanno varie *scale* termometriche. Sono universalmente note tre: 1° *la scala Celsius o centigrada;* 2° *la scala Réaumur;* 3° *la scala Fahrenheit.*

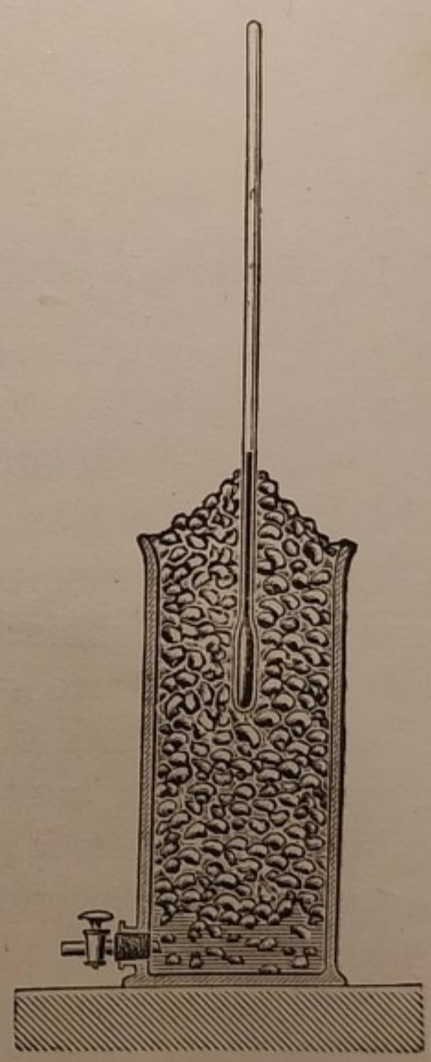


Fig. 188.

In tutti i casi vanno prima segnati sul cannello due punti, detti *punti fissi*, ottenibili facilmente in tutti i luoghi e in tutti i tempi. Ottime per lo scopo sono la temperatura del ghiaccio fondente, e quella del vapore sprigionantesi dall'acqua bollente sotto la pressione normale di un'atmosfera.

Per segnare il primo punto s'immerge il termometro nell'apparecchio della figura 188, contenente ghiaccio pesto in fusione. Per segnare l'altro serve l'apparecchio indicato nella figura 189, ove il termometro si trova quasi totalmente avvolto da un duplice strato di vapore di acqua bollente, che sta nella parte inferiore.

I due punti così ottenuti sul termometro sono contrassegnati per la *scala Celsius* con 0 e 100, e l'intervallo si divide in 100 parti eguali. La divisione può prolungarsi al di sopra del 100 e al di sotto dello 0.

In tal modo, se un termometro messo a contatto con un dato corpo segna 30, diremo che la temperatura del corpo è 30°, volendo con ciò significare che il mercurio del termometro nel passare dal ghiaccio fondente alla temperatura del detto corpo subisce un aumento di volume equivalente ai $\frac{30}{100}$ dell'aumento che subisce nel passare dallo **0** al 100.

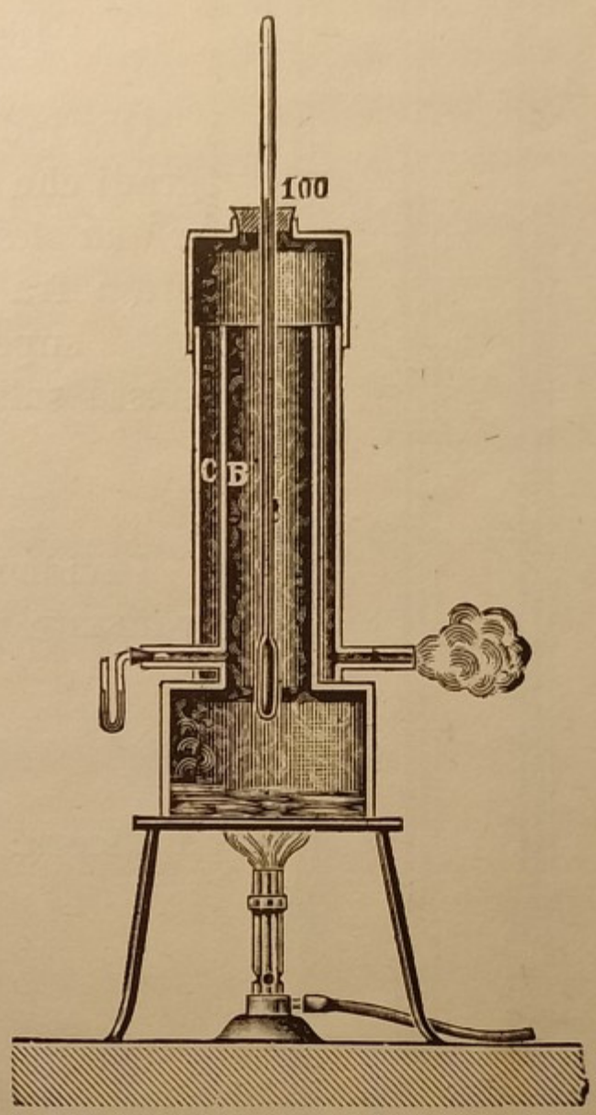


Fig. 189.

Nella *scala Réaumur* ai punti fissi sono segnati i numeri 0 e 80, e l'intervallo è diviso in 80 parti eguali; così il grado Réaumur è più grande del centigrado, cioè i $\frac{5}{4}$ di questo.

Nella *scala Fahrenheit* i punti stessi hanno i valori 32 e 212 e l'intervallo è diviso in 180 parti eguali.

Queste due ultime scale sono ora poco usate; nelle misure scientifiche si fa esclusivamente uso della scala Celsius; la Fahrenheit è ancora adoperata per gli usi comuni negli Stati Uniti d'America. Vediamo ora la corrispondenza fra le tre scale.

Sopra tre termometri portanti le tre graduazioni (fig. 190) chiamiamo c la lunghezza di un grado sulla scala Celsius, r quella sulla scala Réaumur, e f sulla Fahrenheit.

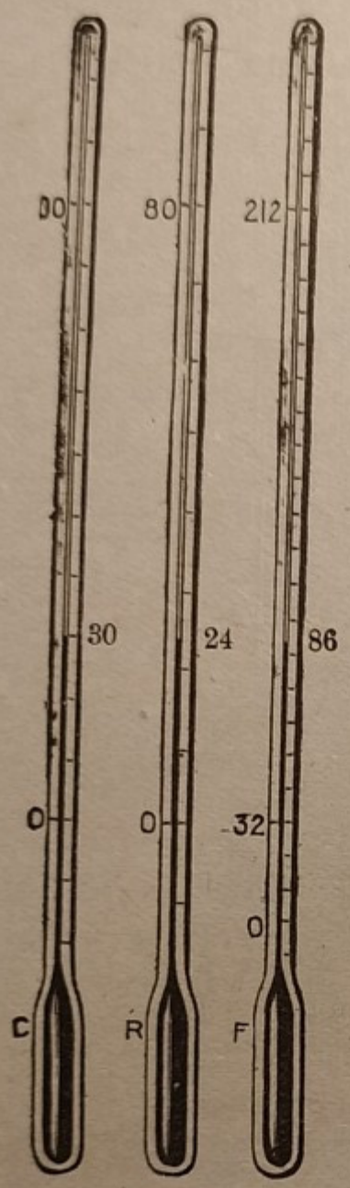


Fig. 190.

L'intervallo compreso *fra i punti fissi* è eguale a:

$$100\,c = 80\,r = (212 - 32)\,f. \qquad (1)$$

Ora indicando con C, R, F i numeri dei gradi che si trovano segnati nelle tre scale a *una stessa temperatura*, la lunghezza compresa fra il punto fisso inferiore e l'estremità superiore del mercurio è ancora la stessa sulle tre scale, cioè:

$$Cc = Rr = (F - 32)\,f. \qquad (2)$$

Dividendo queste tre espressioni rispettivamente per le tre precedenti, si ottiene:

$$\frac{C}{100} = \frac{R}{80} = \frac{F - 32}{180}$$

o ancora:

$$\frac{C}{5} = \frac{R}{4} = \frac{F - 32}{9}. \qquad (3)$$

Queste equazioni sono impiegate per le conversioni; così se è $C = 30$, si ha $R = 24$ ed $F = 86$.

78. Termometri a massima e a minima. — Spesso occorre rilevare il valor massimo o minimo che la temperatura raggiunge in un certo periodo di tempo. Si hanno così i termometri a *massima* e a *minima*, i quali mantengono l'indicazione della massima o della minima temperatura raggiunta.

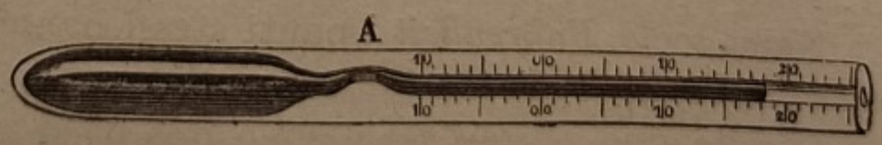


Fig. 191.

La disposizione più frequente usata nel *termometro a massima* è rappresentata nella fig. 191. Il termometro, a mercurio, è disposto orizzontalmente e si differenzia dal tipo ordinario soltanto perchè il cannello, vicino al bulbo, offre una strozzatura, accompagnata talvolta da un incurvamento. In tal modo, finchè la temperatura aumenta, il mercurio, dilatandosi, vince la resistenza offerta al suo passaggio dalla strozzatura e procede regolarmente nel cannello. Ma allorchè, raggiunto il massimo valore, la temperatura discende, la resistenza della strozzatura impedisce al mercurio di retrocedere e avviene un distacco tra il mercurio del bulbo e quello del cannello; il mercurio rimanente nel cannello segna quindi la temperatura massima raggiunta. Imprimendo delle scosse al termometro, nel senso che va dal cannello al bulbo, si costringe la colonna di mercurio a ricongiungersi con quello del bulbo.

Il *termometro clinico* è formato sul tipo del precedente, ma ha soltanto la graduazione compresa tra 30° e 45°, essendo superflue le altre divisioni.

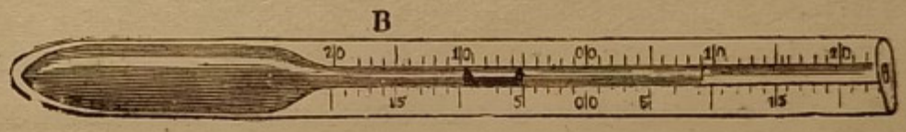


Fig. 192.

Il *termometro a minima* (figura 192) è un termometro ad alcool posto orizzontale. Entro il tubo, immerso nell'alcool, trovasi un *indice*, cioè un cilindretto di vetro colorato, di diametro un po' minore del diametro interno del tubo, sì che l'alcool, per aumento di temperatura, procede nel cannello passando tra l'indice e le pareti del tubo. Intanto l'indice resta fermo, poichè il debole movimento dell'alcool non riesce a spingerlo innanzi con forza sufficiente a vincere l'attrito ch'esso trova contro le pareti del cannello. Se però la temperatura decresce, non appena il menisco dell'alcool viene a contatto con l'estremità dell'indice più lontana dal bulbo, l'indice, per adesione col menisco, che offre la resistenza di una vera e propria membrana (74), torna indietro per tutto il tempo che la temperatura discende, talchè la minima è segnata dalla posizione dell'estremo dell'indice più lontano dal bulbo. Per la messa

a posto dell'apparecchio basta inclinarlo col bulbo in alto, in modo che per effetto del proprio peso, l'indice, scivolando lungo il cannello, vada ad appoggiarsi sul menisco dell'alcool.

Dilatazione.

79. Dilatazione termica dei solidi - Dilatazione lineare. — Le dimensioni di un corpo variano colla temperatura; in particolar modo, individuati due punti qualunque in un corpo solido, la distanza di questi varia colla temperatura. Ciò si esprime dicendo che un corpo subisce per effetto di un cambiamento di temperatura una *dilatazione lineare.*

Lo studio della dilatazione lineare nei solidi si può eseguire riducendo il corpo alla forma di sbarra, e misurando la variazione di lunghezza che questa subisce al variare della temperatura.

Portiamo anzitutto tale sbarra a 0°, immergendola nel ghiaccio fondente, e misuriamone la lunghezza, che indicheremo con l_o. In seguito portiamo la sbarra in un bagno ad una temperatura nota t^o, e misuriamo la nuova lunghezza, che chiameremo l_t. L'allungamento totale della sbarra per la variazione di t^o, è perciò:

$$l_t - l_o;$$

l'allungamento medio per 1° di tutta la sbarra è:

$$\frac{l_t - l_o}{t}$$

e l'allungamento medio per 1°, dell'unità di lunghezza a 0° della sbarra è:

$$\frac{l_t - l_o}{l_o t}.$$

Questo numero lo chiameremo *coefficiente di dilatazione lineare medio fra 0° e t°* della sostanza di cui è fatta la sbarra; lo indicheremo con k. Sarà dunque per definizione:

$$k = \frac{l_t - l_o}{l_o t}. \qquad (1)$$

Tale formola, risolta rispetto a l_t, diventa:

$$l_t = l_o (1 + kt). \qquad (2)$$

L'espressione $1 + kt$ dicesi *binomio di dilatazione lineare.*

Queste formole servono a risolvere tutti i problemi della dilatazione lineare.

Esempio. — Il coefficiente lineare medio fra 0° e 100° del rame è 18×10^{-6}; una sbarra di rame che a 0° è lunga $25^{cm.}$ quanto diventa lunga a 60°?

Abbiamo, applicando la (2):

$$l_{60} = 25\,(1 + 18 \times 10^{-6} \times 60).$$

Eseguite le operazioni si trova:

$$l_{60} = 25^{cm},027.$$

Qui sotto sono segnati i valori del coefficiente di dilatazione lineare medio fra 0° e 100° di alcuni corpi:

Vetro	da 0,0000056 a 0,0000077
Platino	» 0,000009
Ferro	» 0,0000122
Rame	» 0,000017
Zinco	» 0,000029.

Finiamo questi cenni sulla dilatazione lineare ricordando che esiste una lega, una specie di acciaio al nichel — 64 di Fe, 36 di Ni — che ha un coefficiente di dilatazione quasi nullo; avuto riguardo a tale carattere, la lega vien detta *invar.*

80. Dilatazione cubica. — Seguendo un ragionamento analogo al precedente, possiamo definire il *coefficiente di dilatazione cubica* di un corpo qualunque solido, liquido o gassoso.

A tale scopo indicheremo con V_o e V_t i volumi assunti dal corpo in questione alle temperature 0° e t^o e chiameremo *coefficiente medio tra 0° e t^o di dilatazione cubica* il numero α definito dalla formola:

$$\alpha = \frac{V_t - V_o}{V_o t} \qquad (1)$$

dalla quale si ottiene:

$$V_t = V_o (1 + \alpha t). \qquad (2)$$

81. Variazione della densità con la temperatura. — La densità di un corpo è il rapporto tra la massa e il volume (52), quindi la massa è il prodotto della densità per il volume. Indicando con D_o, V_o, e D_t, V_t le densità e i volumi di uno stesso corpo a 0° e a t^o, poichè la massa del corpo non varia colla temperatura, possiamo scrivere:

$$D_o V_o = D_t V_t. \qquad (1)$$

Cioè mentre il volume cresce colla temperatura, la densità diminuisce.

Sostituendo a V_t il suo valore dato dalla (2) del § precedente, abbiamo:

$$D_o V_o = D_t V_o (1 + \alpha t);$$

per conseguenza:

$$D_t = \frac{D_o}{1 + \alpha t}. \qquad (2)$$

82. Dilatazione dei liquidi. — Un liquido essendo contenuto in un vaso, la capacità di questo aumenta col riscaldamento, ciò che maschera in parte la dilatazione del liquido.

Dulong e Petit hanno misurato la dilatazione *vera* o *assoluta* del mercurio con un *metodo indipendente dalla dilatazione del recipiente.*

Il Régnault più tardi riprese le ricerche dei Fisici nominati e trovò che il mercurio ha un coefficiente di dilatazione cubica eguale a 0,000183.

In seguito con svariati procedimenti si studiarono tutti gli altri liquidi e si ottennero i coefficienti notati nella seguente tabella;

Acetone	0,00162	Essenza di trementina	0,00100
Alcool	0,00105	Glicerina	0,00053
Benzolo	0,00138	Olio d'oliva	0,00074
Cloroformio	0,00140	Toluene	0,00121

Il coefficiente medio fra 0° e 100° dell'acqua è 0,00043.

83. Dilatazione dell'acqua. — L'acqua ha un'importanza considerevole in natura; perciò la conoscenza delle sue proprietà è particolarmente interessante.

Nei laboratori spesso usando l'acqua si determina la capacità di un recipiente; occorre dunque conoscerne la densità.

Le esperienze eseguite provano che la dilatazione dell'acqua è *irregolare*. In generale il volume di un liquido diminuisce in modo continuo quando lo si raffredda. L'acqua non segue sempre questa regola. Al di sotto di 4° essa si dilata invece di contrarsi; *a 4° il volume di una data massa d'acqua è minimo e la densità è massima.*

La dilatazione anomala dell'acqua spiega facilmente perchè il ghiaccio cominci a formarsi alla superficie delle masse d'acqua esposte ai freddi invernali.

84. Dilatazione dei gas. — I gas sono eminentemente dilatabili, com'è stato provato con elementari esperienze (4).

Ma mentre che nei solidi e nei liquidi le variazioni di volume dipendono in maniera quasi esclusiva dai cambiamenti di temperatura, nel caso dei gas il volume posseduto da una data massa della sostanza, è dipendente non solo dalla temperatura, ma anche dalla pressione. Per conseguenza, nello studiare gli effetti del calore, noi dovremo precisare bene la pressione alla quale il gas si trova sottoposto prima e dopo il riscaldamento.

Lo studio della dilatazione può essere fatto in due condizioni particolarmente semplici: si può cioè mantenere invariata la pressione a cui il gas è sottoposto, e misurare gli aumenti di volume provocati da noti aumenti di temperatura; in tal caso si studia *il gas a pressione costante.*

Oppure si può, mentre si fa variare la temperatura, costringere il gas a conservare invariato il volume primitivo, regolando convenientemente la pressione, e misurare la nuova pressione; in quest'ultimo caso si studia *il gas a volume costante.*

Nella prima maniera i gas vennero studiati dal nostro Volta e meglio dal Gay-Lussac; costui trovò anzi la legge che porta il suo nome e che dice:

Tutti i gas si dilatano egualmente, con un coefficiente di dilatazione eguale a $\frac{1}{273}$, *e tale coefficiente è indipendente dalla pressione e dai limiti di temperatura entro i quali si opera.*

Talchè, indicando con α tale coefficiente, ai gas riscaldati a pressione costante si adatta la formola nota:

$$V_t = V_o (1 + \alpha t) \qquad (1)$$

dove α è eguale a $\frac{1}{273} = 0{,}003655$.

Il riscaldamento dei gas a *volume costante* fu con molta cura studiato dal Régnault, che rifece anche gli studi di Gay-Lussac.

Il Régnault trovò che in tali circostanze la pressione assunta dal gas varia colla temperatura seguendo la stessa legge dei volumi; sicchè, detta H_o la pressione a 0° e H_t quella a t^o, si ha la formola:

$$H_t = H_o (1 + \beta t); \qquad (2)$$

dove β è il così detto *coefficiente di tensione.*

I coefficienti α e β sono approssimativamente eguali a $\frac{1}{273}$.

85. Temperatura assoluta. — Se nella (2) del § precedente si sostituisce a β il valore teorico $\frac{1}{273}$, si ottiene:

$$H_t = H_0\left(1 + \frac{1}{273}\, t\right); \qquad (1)$$

formola valida a tutte le temperature soltanto per un *gas perfetto*, cioè per un gas che seguisse rigorosamente la legge di Boyle e Mariotte (63) e quella poco sopra esposta di Gay-Lussac.

Ci domandiamo: a qual temperatura la pressione del gas risulterebbe eguale a zero? Serve per risolvere la questione la formola precedente, in cui si faccia $H_t = 0$; quindi la temperatura richiesta è la temperatura t che soddisfa all'equazione:

$$0 = H_0 \left(1 + \frac{1}{273}\, t\right).$$

Da questa si rileva che, avendo H_0 un valore finito, deve essere:

$$1 + \frac{1}{273}\, t = 0\,;$$

ossia:

$$t = -273^\circ.$$

La pressione di un gas perfetto si annulla dunque a -273°, e quindi, per la teoria cinetica dei gas (86), a quella temperatura cessano gli urti delle molecole contro le pareti del recipiente e quindi il moto delle molecole. Si noti poi che, essendo il calore, secondo l'ipotesi più accreditata, dovuto ad un movimento delle molecole dei corpi, l'annullarsi della velocità di queste deve equivalere alla cessazione del calore. Vuol dire che un gas non può essere raffreddato al disotto di -273°. In vista di ciò si può convenire di adottare questa temperatura, che è la più bassa di tutte, come *zero assoluto*, e di contare da quel punto i gradi termometrici. Or la temperatura T° di un corpo, contata a partire dallo zero assoluto, si chiama *temperatura assoluta* e si ottiene evidentemente sommando 273 all'indicazione t° del comune termometro; avremo cioè:

$$T = t + 273.$$

86. Teoria cinetica dei gas. — A dilucidazione di alcuni fatti esposti nei precedenti paragrafi, crediamo di dare una succinta esposizione della teoria cinetica dei gas. In varie occasioni s'è detto che i corpi sono formati di *molecole*, cioè di minutissime particelle, che per la loro estrema piccolezza sfuggono anche all'azione dei più potenti microscopi. Delle

molecole la Scienza ha però, con geniali metodi di investigazione, calcolato l'ordine di grandezza, che risulta essere di un centimilionesimo di centimetro.

Le molecole dei corpi non sono però mai ferme, ma animate da continuo moto che si compie con velocità tanto maggiore quanto più alta è la temperatura; ma c'è questa differenza tra corpo e corpo: nei solidi le molecole descrivono una traiettoria che è o un segmento su cui vanno e vengono oscillando a mo' di un pendolo, o girano sopra un'orbita chiusa. Invece nei liquidi e nei gas, dove le distanze molecolari sono molto maggiori che nei solidi, le molecole hanno maggior libertà di movimento e percorrono tra gli spazi intermolecolari movimenti in tutti i sensi, rimescolandosi e urtandosi ogni tanto fra loro. Tale movimento è anche detto *agitazione termica*, perchè la velocità media delle molecole cresce al crescere della temperatura, anzi, la *temperatura* nel vero senso fisico non è altro che la *velocità media molecolare*.

Dato tale stato di cose, è logico che nei gas, in particolar modo, le molecole urtino anche contro le pareti, che così sono soggette da parte di tali minuscoli proiettili a un continuo e vivo bombardamento, donde appunto deriva la *pressione* del gas contro le pareti.

Allo zero assoluto, come s'è già detto, un gas perfetto non esercita alcuna pressione sulle pareti, vuol dire che in tale condizione mancano gli urti molecolari e le molecole sono in perfetto riposo. Ma a temperature superiori allo zero assoluto le molecole dei gas hanno velocità medie che possono essere assai elevate. Si è infatti trovato che a 0° le molecole dell'idrogeno hanno la velocità media di 1820 m. al secondo.

Si comprende quindi che l'energia cinetica molecolare $\frac{mv^2}{2}$ è molto elevata nei gas portati ad alta temperatura per effetto dei forti valori che vi assumono le velocità molecolari, da cui derivano le forti pressioni sulle pareti dei recipienti.

Calorimetria.

87. Quantità di calore; caloria. — Osservammo già che la temperatura di un corpo non deve confondersi con la quantità di calore che esso possiede. Anche il calore è una grandezza suscettibile di misura con una unità scelta convenientemente. Ed è appunto la *calorimetria* il capitolo della Termologia che tratta di tale misura.

Il Congresso internazionale di Fisica del 1900 ha scelto, come *unità di quantità di calore*, la *piccola caloria* o *caloriagrammo*, cioè la quantità di calore necessaria per riscaldare in media di 1° centigrado fra 0° e 100° un grammo-massa d'acqua. Nell'industria si usa più spesso la *grande caloria* o *caloria-chilogrammo*, mille volte maggiore della precedente.

Nell'industria del freddo, oggi molto sviluppata, non altro che per semplicità di linguaggio, si usa come unità la *frigoria*, che invero non è una nuova unità; la si potrebbe chiamare *caloria negativa*. Le macchine frigorifere hanno per fine di sottrarre del calore, sicchè la loro potenza si misura dal numero delle calorie che *sottraggono* in un'ora, ciò che equivale a dire, dal numero di *frigorie-ora* che *producono*.

88. Capacità termica e calore specifico. — La *capacità termica* di un corpo è l'attitudine di richiedere, per una data massa, una quantità di calore maggiore o minore per riscaldarsi di un dato numero di gradi; cosicchè di due corpi ha capacità termica più alta quello che, a parità di massa, richiede più calore per riscaldarsi dello stesso numero di gradi.

Chiameremo poi *calore specifico medio tra 0° e t°*, di un corpo, il numero di piccole calorie che bisogna comunicare ad un grammo-massa del detto corpo per riscaldarlo in media di 1° fra *0°* e *t°*.

Il calore specifico dell'acqua è perciò eguale a 1.

Se ora indichiamo con Q le piccole calorie che occorre comunicare ad un certo corpo della massa di M grammi per riscaldarlo da t^o_1 a t^o_2 e con c indichiamo il calore specifico medio tra t^o_1 e t^o_2, abbiamo evidentemente:

$$Q = cM\,(t_2 - t_1); \qquad (1)$$

cioè:

Le piccole calorie necessarie per operare il riscaldamento di un corpo sono misurate dal prodotto del calore specifico per la massa del corpo in grammi e per il salto di temperatura.

La stessa formola serve anche a misurare il calore che un corpo perde quando si raffredda.

Tale formola, è evidente, serve anche per l'acqua, basta farvi $c = 1$.

Risolvendo la (1) rispetto a c, si ha:

$$c = \frac{Q}{M(t_2 - t_1)}. \qquad (2)$$

Per conoscere dunque il calore specifico d'una sostanza bisogna conoscere i valori di M, Q, t_1 e t_2.

Fig. 193.

La bilancia ci fornisce il valore di M, i *calorimetri* i valori delle altre grandezze.

Fra i diversi calorimetri diamo una breve descrizione del calorimetro a ghiaccio, perchè il più semplice, sebbene non dia i migliori risultati. Lo si dice anche *a pozzetto di ghiaccio* perchè è formato di un blocco di ghiaccio, nel quale si opera prima una cavità sufficiente a comprendere il corpo che si sottopone all'esperienza, e di un altro blocco, spianato convenientemente, che copre la detta cavità (fig. 193).

Determinata la massa M in grammi del corpo, lo si riscalda in una stufa a secco fino ad una temperatura sufficientemente elevata T^o, quindi lo si mette nel pozzetto, che viene subito

chiuso. Il calore ceduto dal corpo viene in tal modo impiegato a fondere una certa quantità di ghiaccio. L'acqua risultante dalla fusione si raccoglie mediante una spugna e la si pesa. Se m è la sua massa in grammi, il numero di calorie occorse per la fusione è $79,7 \times m$, poichè si sa che per fondere un grammo di ghiaccio occorrono appunto 79,7 calorie. In tal modo il prodotto McT misura le calorie perdute dal corpo nel passare da T^o a 0°, e $79,7 \times m$ quelle occorse per la fusione degli m grammi di ghiaccio, d'onde l'equazione:

$$McT = 79,7 \times m\,;$$

dalla quale si ricava:

$$c = \frac{79,7 \times m}{MT}\,.$$

89. Risultati generali relativi ai calori specifici dei solidi e dei liquidi. — 1° Il calore specifico di una sostanza allo stato liquido è maggiore che allo stato solido; 2° se si eccettua l'idrogeno, che ha calore specifico 3,41 allo stato gassoso e circa 6 allo stato liquido, l'acqua è il corpo che ha il *massimo calore specifico*, ossia la più grande capacità termica.

Alcuni dati numerici.

Calori specifici di alcuni corpi comuni
verso 20°.

Alluminio	0,22	Acqua	1
Ferro	0,11	Mercurio	0,0331
Rame	0,09	Alcool	0,60
Piombo	0,031		

Calori specifici allo stato

	solido	liquido
Acqua	0,5	1
Fosforo	0,189	0,240
Piombo	0,032	0,040

90. Importanza dell'elevata capacità termica dell'acqua. — Abbiamo osservato che l'acqua è la sostanza che ha la massima capacità termica; cioè, ripetiamolo, richiede, per scaldarsi, a parità di condizioni, una quantità di calore notevolmente più grande che non gli altri corpi.

Le numerose applicazioni dell'acqua e la sua funzione nei fenomeni naturali, dànno a questo fatto un'importanza straordinaria.

Si utilizza l'acqua calda nei caloriferi, col sistema detto a *termosifone*, perchè l'acqua, raffreddandosi, cede una quantità di calore molto più grande di quella che potrebbe cedere qualunque altro corpo a parità di massa.

Le acque naturali, in contatto coll'atmosfera, compiono una funzione regolatrice della temperatura, cedendo molto calore quando quella tende ad abbassarsi e assorbendone, al contrario, quando tende ad innalzarsi. Così l'inverno sulle spiaggie è mite e l'estate non molto calda.

Nell'Irlanda, favorita anche dalla corrente del Golfo, l'inverno è più mite che nell'Alta Italia; il mirto colà vive all'aria libera; viceversa l'uva non arriva a maturazione per il troppo fresco d'estate.

Propagazione del calore.

Quando due corpi a diversa temperatura si trovano nello stesso ambiente, tende a stabilirsi l'equilibrio delle temperature per passaggio di calore dal corpo caldo al corpo freddo. La propagazione può avvenire: 1° per *conduttività*; 2° per *convezione* o *trasporto*; 3° per *irraggiamento*.

91. Conduttività. — In questo caso il calore passa per *contatto* dalle particelle calde a quelle fredde d'un corpo ed innalza la loro temperatura senza trasporto di materia e *senza cambiamento delle posizioni relative fra le molecole.*

Una sbarra di *ferro* arroventata ad una estremità è ancora molto calda a una grande distanza da tale estremità, special-

mente se è grossa. Mentre una sbarra di *legno* può essere tenuta ad un estremo quando brucia dall'altra parte, e il calore non raggiunge la mano, nemmeno se l'asta è corta, com'è il caso dei fiammiferi.

Un cucchiaio *d'argento*, immerso a metà in un liquido caldo, si scalda rapidamente in tutta la sua lunghezza; un cucchiaio di *legno*, al contrario, è appena caldo nella parte sporgente dal liquido. I manichi di legno delle caffettiere e delle theiere metalliche possono tenersi in mano, come avviene per le impugnature in legno dei ferri da stiro.

I metalli sono perciò detti *buoni conduttori* del calore; il legno, il sughero, il vetro sono *cattivi conduttori*.

È dovuto alla conduttività dei metalli e del marmo, se toccandoli sembrano freddi, perchè il calore della mano viene da tali corpi rapidamente sottratto e disperso nella loro massa, senza riscaldarli in modo apprezzabile. Poggiando invece la mano sopra una tavola di legno, si riscaldano soltanto i punti di contatto, che diventano subito caldi e perciò fanno giudicare il legno più caldo del metallo e del marmo.

Di tutti i corpi l'argento è il più buon conduttore, poi vengono gli altri metalli. I minerali, il vetro, la porcellana sono anche discreti conduttori; le sostanze di origine vegetale, come il legno, il sughero, il cotone, e le sostanze organiche animali, come i peli e la lana, conducono assai poco.

Vengono poi a grandissima distanza i liquidi.

I gas non hanno conducibilità sensibile.

92. Proprietà delle reti metalliche - Lampada di sicurezza. — La buona conduttività termica dei metalli spiega un particolare comportamento che hanno le reti metalliche rispetto alle fiamme. Una rete metallica appoggiata sopra una fiamma a gas (fig. 194 *a*) sottrae al gas una gran parte del suo calore, distribuendolo rapidamente in tutta la sua massa e disperdendolo rapidamente nell'aria. In tal modo la rete si arroventa qualche po', ma senza assumere la temperatura di accensione del gas, che va via incombusto attraverso le maglie della rete. Prova ne è che mettendo un fiammifero acceso sopra la rete, la fiamma si completa.

Se poi si pone la rete al disopra del becco dal quale il gas esce incombusto, si può accendere il gas sopra la rete (fig. 194 *b*) senza che l'accensione si propaghi al disotto.

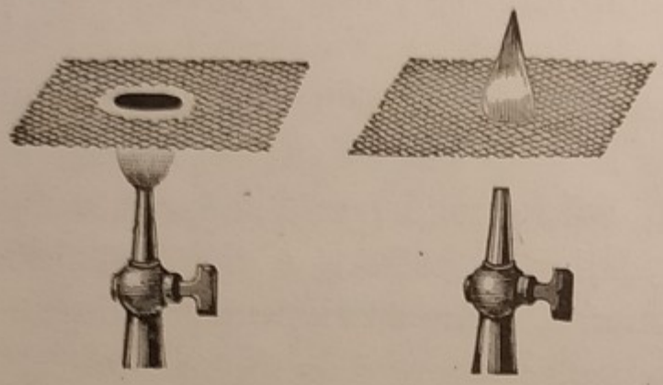


Fig. 194 *a*. Fig. 194 *b*.

Le reti metalliche hanno per tale proprietà ricevuto una importante applicazione nella *lampada di sicurezza* di Davy. Uno dei più gravi pericoli nelle miniere di carbon fossile dipende dallo sviluppo del *grisou*, che si accumula nella parte superiore delle gallerie, e, mescolato coll'aria, dà luogo, quando s'infiamma, a formidabili esplosioni. Investiti dalle fiamme dell'esplosione i minatori son bruciati vivi; ma quand'anche non perdano la vita in tal maniera, vengono asfissiati dall'anidride carbonica che si produce.

Prima che il Davy inventasse la sua famosa lampada il minatore doveva accontentarsi della luce prodotta dalle scintille che cavava dalla pietra focaia battuta coll'acciarino, poichè si sapeva che tali scintille erano incapaci di accendere il grisou.

La lampada Davy è in sostanza una lampada ad olio (fig. 195) la cui fiamma è circondata da un cilindro di rete metallica, chiuso in alto. Quando la lampada è alimentata dall'aria pura, la fiamma brucia coll'ordinario splendore d'una lampada ad olio; ma quando il minatore entra in un'atmosfera contenente il grisou, la fiamma si allarga, diventa fuligginosa per deficienza di ossigeno, scoppietta per l'accensione del grisou penetrato attraverso la rete, ma questa non si arroventa e l'accensione non si comunica all'esterno.

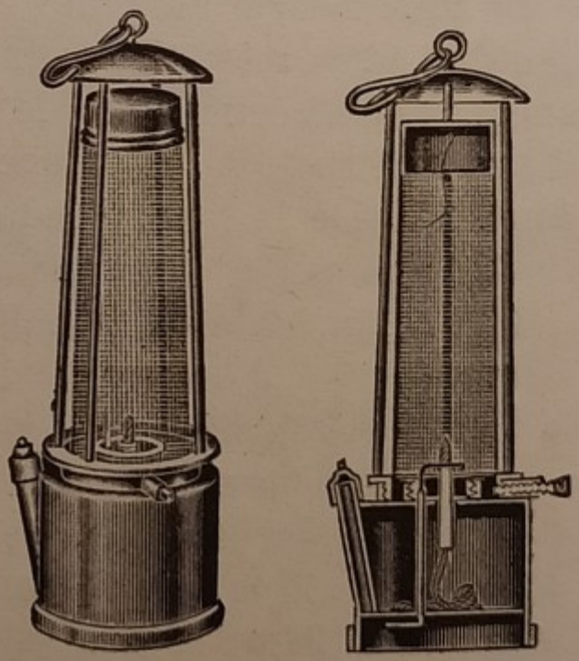


Fig. 195.

Il minatore avvertito dalla irregolarità della combustione della lampada dell'imminente pericolo procura di mettersi in salvo.

93. **Calorifughi.** — Si chiamano con questo nome i corpi cattivi conduttori del calore, che hanno, come tali, delle applicazioni industriali.

Il difetto di conducibilità della lana, del feltro e simili veniva da molto tempo utilizzato nel Nord d'Europa, nella costruzione di un apparecchio, che si chiamava *pentola automatica* e che è stato largamente usato durante l'ultima guerra dai privati e in special modo dal nostro Esercito, col nome di *cassa di cottura*. È questa una scatola di legno — può servire alla meglio una comune scatola da panettone — foderata all'interno da un grosso strato di feltro, di lana o economicamente anche di quei sottili trucioli di legno che servono per imballaggi. Dentro la cassetta resta posto per una pentola di metallo, munita del suo coperchio, sopra il quale occorre mettere un cuscinetto di feltro o simile. La pentola si fa prima bollire sul fornello con dentro le vivande che si vuol cuocere, e subito dopo la si pone nella cassetta, abbandonando l'apparecchio a se stesso. La cottura continuerà senza fuoco e dopo qualche ora sarà completa.

I calorifughi più usati nell'industria sono il sughero, l'amianto, il feltro, la segatura di legno, ecc. Coi detriti di sughero si fanno agglomerati di forma diversa, impiegati per preservare dal raffreddamento le condotte del vapore, e dal riscaldamento le camere dei frigoriferi, ecc.

94. **Irradiazione.** — È un processo di propagazione del calore che mette bene in rilievo la stretta relazione di origine fra il calore e la luce. L'irraggiamento termico si effettua anche attraverso il vuoto, come si può provare con un termometro collocato entro una grossa bolla di vetro in cui è fatto il vuoto (fig. 196) e posto in prossimità di una sorgente calorifica.

Così arriva alla Terra attraverso il vuoto interplanetario il calore solare.

Il calore che si propaga in tal modo si chiama *calor raggiante* e possiede le proprietà caratteristiche di attraversare

molte sostanze senza riscaldarle sensibilmente e di propagarsi rettilineamente tutto intorno alla sorgente. Così noi chiamiamo *raggio calorifico* ognuna delle direzioni secondo cui avviene la propagazione.

Fig. 196.

Noi non possiamo qui addentrarci nello studio del calore raggiante, argomento che è stato trattato con rara abilità dal nostro fisico Macedonio Melloni di Parma, perchè tale studio esorbita dai limiti di un programma elementare di Fisica, e presuppone la nozione di fenomeni ottici che verranno studiati più innanzi.

Ci limiteremo ad accennare che corpi caldi, messi in un ambiente meno caldo, irradiano calore. La quantità di calore irradiata dipende dalla natura della superficie del corpo caldo, dalla natura e dalla pressione del gas ambiente e, a parità di altre condizioni, è *proporzionale all'area della superficie irradiante e all'eccesso di temperatura del corpo sull'ambiente.* È questa la così detta *legge di Newton* sul raffreddamento.

95. Convezione o trasporto del calore. — I liquidi e i gas sono cattivi conduttori; ma in essi il calore si propaga per effetto di movimenti molecolari che si destano nella loro massa quando si verificano degli squilibri di temperatura nelle loro diverse parti.

Avviene infatti che scaldando in un punto qualunque un liquido o un gas, ivi la densità diminuisce, e in conseguenza le particelle divenute più leggere salgono dentro il fluido *trasportando* con sè del calore.

In tal modo si trasmette verso il soffitto di una stanza il calore di un fornello; le parti dell'aria che vengono a contatto col fuoco, si scaldano e diminuendo di densità salgono in alto cedendo alle molecole fredde che incontrano il loro calore.

Tale ascesa provoca però la discesa delle particelle meno calde, che vengono ad occupare il posto delle prime, e riscaldandosi alla loro volta, dànno origine a due correnti: una più calda ascendente, e una meno calda discendente.

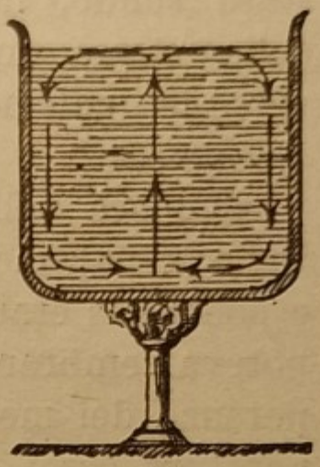


Fig. 197.

Il fenomeno si può mettere in evidenza scaldando dell'acqua, contenuta in un vaso di vetro, nella parte inferiore. I movimenti delle particelle, quello centrale in salita e quelli laterali discendenti lungo le pareti, risultano nettamente visibili immergendo nell'acqua della segatura di legno duro (figura 197).

Simile meccanismo di propagazione del calore si effettua, come si è accennato, nei gas; è perciò che la massa dei gas caldi, che entra nel camino di un focolare, s'innalza su per la canna, e richiama al disotto della griglia l'aria pura necessaria per attivare la combustione del combustibile.

Non diversa è l'origine dei venti. Il vento è *aria in movimento* provocata da una differenza di pressione tra due masse d'aria vicine. Il vento soffia dalla regione dove la pressione è più elevata verso quella dov'è minore. Le differenze di pressione poi hanno origine principalmente da squilibrî di temperatura.

Infatti, sopra una superficie scaldata dal sole, l'aria diminuisce di densità e si solleva; così si manifesta una diminuzione di pressione, per cui l'aria circostante si mette in moto affluendo verso tale regione. Si ha così un vento superficiale che spira dalle regioni meno calde verso la regione più calda.

Cambiamenti di stato.

Noi riusciamo facilmente a fondere del ghiaccio, poi a far passare l'acqua di fusione allo stato di vapore. Per sottrazione di calore, otteniamo le trasformazioni inverse. Lo stesso corpo, per esempio l'acqua, può prendere successivamente i tre stati:

solido, liquido, gassoso. Questo risultato è generale, com'era stato, oltre un secolo addietro, enunciato da Lavoisier: « lo stato solido, liquido ed aeriforme sono tre stati differenti della stessa materia, tre modificazioni particolari attraverso le quali possono passare successivamente quasi tutte le sostanze ».

All'epoca nella quale il celebre scienziato scriveva queste righe (1790), molte sostanze solide non erano ancora state fuse, e pochi gas erano stati liquefatti, e l'affermazione di Lavoisier poteva sembrare piuttosto arrischiata; ma oggi, in grazia alla potenza dei mezzi di cui disponiamo per produrre delle temperature assai basse ed assai elevate, le sostanze *refrattarie* sono state fuse, e i gas *permanenti* sono stati liquefatti, talchè le idee di Lavoisier sui cambiamenti di stato sono interamente giustificate.

96. Fusione e leggi. — La fusione è il passaggio dallo stato solido allo stato liquido.

Innalzando progressivamente la temperatura di un corpo, possono presentarsi diversi casi:

1° il corpo fonde bruscamente, ciò che avviene, ad esempio, per il ghiaccio, il fosforo, la naftalina, il piombo, ecc.; si ha allora la fusione *brusca;*

2° il corpo passa dallo stato solido allo stato liquido rammollendosi gradualmente; ad esempio, la ceralacca, il quarzo, il vetro, il ferro; la fusione si dice *pastosa;*

3° il corpo passa direttamente dallo stato solido allo stato di vapore; il fenomeno è detto *sublimazione.* Si comportano così la neve carbonica, l'arsenico ed altri corpi mantenuti alla pressione atmosferica. Tuttavia tali sostanze possono fondere operando a pressione sufficientemente elevata.

Sostanze propriamente refrettarie non esistono; alla temperatura del forno elettrico — 3500° — si ottiene la fusione di tutti i corpi; tuttavia continuano a chiamarsi refrattari l'argilla, la magnesia, la calce, il carbone, il boro, il silicio, la silice, che non fondono al fuoco della forgia.

Riassumendo, tutti i corpi sono fusibili, eccettuati quelli che si decompongono col calore, o che sublimano nelle condizioni di pressione dell'esperienza.

Soltanto la fusione brusca è regolata da leggi precise, che sono:

1° *sotto una data pressione una sostanza chimicamente definita fonde a una temperatura determinata, diversa da sostanza a sostanza;*

2° *tale temperatura non varia, restando invariata la pressione, finchè tutto il corpo non sia interamente fuso.*

Questa temperatura costante, alla quale si inizia e si compie il fenomeno della fusione, chiamasi *temperatura* o *punto di fusione*, e se avviene alla pressione di un'atmosfera la chiameremo *temperatura di fusione normale.*

Ecco alcuni punti di fusione normale:

Mercurio	—38°,8	Argento	960°
Ghiaccio	0°	Oro	1063°
Stagno	232°	Rame	1083°
Piombo	327°	Ferro puro	1510°
Zinco	419°	Platino	1755°
Alluminio	658°	Iridio	2300°

Tungsteno verso 3000°.

97. Cambiamento di volume durante la fusione. — In generale i corpi *si dilatano bruscamente* durante la fusione, vale a dire la loro densità diminuisce; così, ad esempio, per il fosforo, per lo zolfo, ecc., le parti solide, durante la fusione rimangono sul fondo del vaso. Pochi corpi, al contrario, fondendo si *contraggono bruscamente*; così avviene per il ghiaccio che mentre sta fondendo galleggia sull'acqua; anche la ghisa, il bismuto e l'argento hanno lo stesso comportamento del ghiaccio.

Poichè l'acqua gelando aumenta di volume ci spieghiamo perchè facendo solidificare dell'acqua in recipiente chiuso, per effetto dell'aumento di volume che accompagna la congela-

zione, ne deriva un aumento enorme di pressione che il più delle volte è causa della rottura del vaso. In tal modo d'inverno si fendono i tubi di ferro dell'acqua potabile quando questa vi si congeli, e per la stessa ragione le roccie vengono ridotte in frammenti dall'acqua che gela nelle loro fenditure, e durante le primavere precoci, se si manifestano degli abbassamenti di temperatura, la linfa congelando nei vasi delle piante, li lacera.

I corpi che subiscono la fusione pastosa durante la fusione aumentano di volume, ma *gradualmente*.

98. Variazione del punto di fusione colla pressione. — In alcuni corpi un aumento di pressione ne eleva il punto di fusione, per altri succede l'opposto.

Per il ghiaccio si constata un abbassamento nel punto di fusione di 1° per l'aumento di 134 atmosfere.

Il ghiaccio insomma sottoposto a pressione fonde sotto zero.

L'abbassamento del punto di fusione del ghiaccio coll'au-

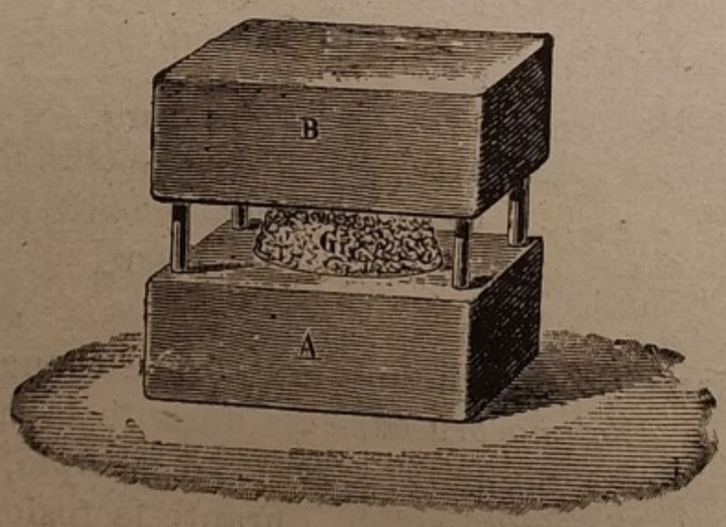


Fig. 198.

mento della pressione fu studiato con procedimenti su cui non possiamo fermarci; ci limiteremo a descrivere qualche esperienza scolastica che dimostra qualitativamente il fenomeno. Se si mettono dei frammenti di ghiaccio fra due forme cave di legno duro (fig. 198), sottoposte a forte pressione anche con un semplice copialettere, la pressione determina la fusione

d'una piccola quantità di ghiaccio nei punti di contatto, l'acqua di fusione invade gli interstizi e, sottratta così alla pressione, vi *rigela* riunendo i pezzi in un'unica massa di ghiaccio che ha la forma del modello in legno (fig. 199).

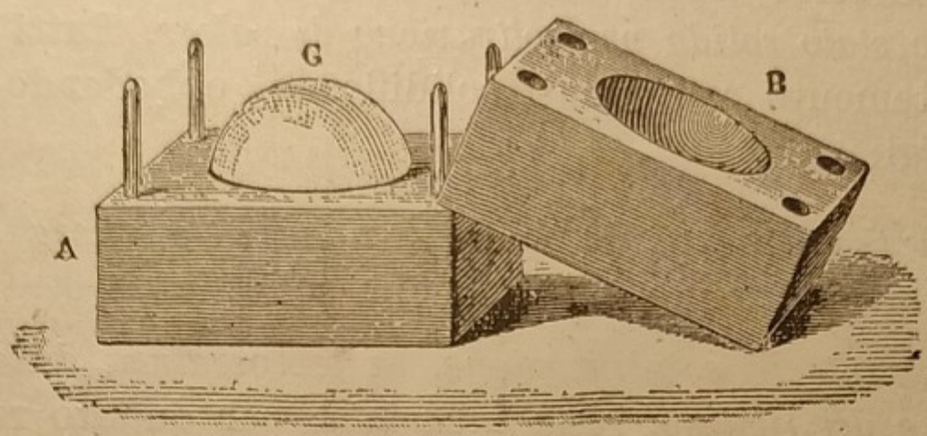


Fig. 199.

Un'altra esperienza che ha la stessa spiegazione si può eseguire disponendo a cavalcioni sopra un grosso pezzo di ghiaccio un sottile filo di acciaio a cui è sospeso un grosso peso (fig. 200). Si osserva che il filo si affonda lentamente nel ghiaccio e lo attraversa completamente senza separarlo in due parti distinte.

Ciò avviene perchè nei punti direttamente premuti, ove la forza per unità di superficie è molto grande, il ghiaccio essendo a 0° o anche a temperatura qualche poco inferiore, passa allo stato liquido, poichè si trova a temperatura superiore a quella di fusione corrispondente alla pressione a cui è sottoposto. L'acqua che ne deriva sfugge alla pressione passando sul dorso del filo e vi rigela.

Fig. 200.

Così si può spiegare la formazione delle palle di neve che si ottengono premendo la neve soffice fra le mani e così anche è stato spiegato il fenomeno del movimento dei ghiacciai, fenomeno che una volta veniva attribuito alla plasticità del ghiaccio, che in verità non è affatto plastico,

Su tale fenomeno, detto di *rigelo*, ha richiamato l'attenzione per primo il Faraday nel 1850.

99. Solidificazione e surfusione. — La solidificazione è il fenomeno inverso della fusione, cioè il *passaggio dallo stato liquido allo stato solido per sottrazione di calore.* Tutti i liquidi convenientemente raffreddati solidificano, obbedendo alle seguenti leggi:

1° *La temperatura di solidificazione è la stessa della fusione;* il ghiaccio fonde a 0°, l'acqua solidifica a 0°.

2° *Durante la solidificazione, la temperatura della miscela del solido e del liquido, resta invariata;* per quanto rapida sia la sottrazione di calore, la temperatura non comincia ad abbassarsi se non quando la solidificazione è completa.

La surfusione è un *ritardo nella solidificazione* di un corpo che resta liquido a una temperatura inferiore al suo punto di fusione. Con particolari precauzioni si può raffreddare l'acqua fino a — 15° senza che solidifichi; occorre perciò che l'acqua sia sottratta ad ogni agitazione, che sia disaerata mediante preventiva prolungata ebollizione, e protetta dal contatto dell'aria da uno strato d'olio. L'acqua contenuta in un tubo capillare può essere raffreddata fino a — 20° senza solidificare.

Un liquido soprafuso solidifica portandovi in contatto *una particella solida della sostanza allo stesso stato molecolare.* Il fosforo soprafuso solidifica a contatto del fosforo bianco, mentre un frammento di fosforo rosso resta senza effetto. Un'azione meccanica, urto, scuotimento, determina anche la solidificazione.

La solidificazione di un liquido soprafuso ha luogo bruscamente e con sviluppo di calore, e al momento in cui la surfusione cessa, la temperatura sale e raggiunge di solito la temperatura di fusione.

Il fenomeno della surfusione è attribuito a uno stato di equilibrio instabile delle molecole, equilibrio che può essere rotto cogli artifizi sopra accennati.

100. Fusione delle leghe. — Le leghe possono considerarsi come soluzioni di un metallo in un altro; il loro punto di fusione è più basso di quelli dei metalli onde sono composte. E tutti sanno che se ne trae partito per saldare fra loro due pezzi. La saldatura deve essere più facilmente fusibile dei metalli da riunire insieme; così una lega formata con piombo e stagno, in modo che il peso di questo vi entri per due terzi, può servire benissimo a saldare oggetti di stagno. Si preparano alcune leghe, dette leghe di Darcet, di Wood, ecc., formate di *Bi*, *Sn*, *Pb*, *Cd*, che fondono a temperature anche inferiori a 100°, mentre lo *Sn*, che è il più fusibile dei componenti, fonde a 232°. Una lega formata con 80 parti di *Bi*, 30 di *Sn*, 50 di *Pb* e 20 di *Hg*, fonde a 53°.

101. Calore di fusione. — Qualunque cambiamento di stato si compie o con assorbimento o con cessione di calore fatto dal corpo.

Per darci ragione del fatto devesi tener presente che le molecole dei corpi sono legate da una mutua coesione, e che sono continuamente in moto. Si ritiene che il calore sia una energia cinetica molecolare e che la temperatura consista nella velocità media delle molecole.

Comunicare del calore a un corpo significa metterlo a contatto di un altro a maggiore temperatura, cioè avente molecole animate da una velocità media superiore. Avviene allora che per effetto degli urti ricevuti le molecole del primo acquistano un aumento di velocità: *il corpo si riscalda*. Può però avvenire che il calore ricevuto venga impegnato tutto o in parte ad eseguire uno spostamento o un nuovo assetto delle molecole in opposizione alla loro mutua coesione: si ha così una trasformazione di energia da cinetica a potenziale. Questo avviene nella fusione. Nella solidificazione invece si consegue un assetto molecolare inverso, per cui dell'energia potenziale si converte in cinetica e il corpo abbandona del calore.

È detto *calore di fusione* di una sostanza il numero di piccole calorie che bisogna comunicare a un grammo-massa del corpo per fonderlo senza cambiamento di temperatura.

L'acqua (il ghiaccio) ha un elevatissimo calor di fusione, circa 80, ciò che spiega la lentezza con cui i ghiacci e le nevi delle montagne fondono durante l'estate. Tale lentezza assicura la continuità dei corsi d'acqua e delle sorgenti.

102. Evaporazione. — L'evaporazione è il passaggio di un liquido allo stato aeriforme e può avvenire a qualunque temperatura. La rapidità però con cui il passaggio si effettua, dipende dalla natura della sostanza, e cresce coll'aumentare della temperatura e col diminuire della pressione che regna nell'ambiente.

Se questo è limitato, qualunque sia il liquido e la temperatura, è anche limitata la quantità di vapore che può formarvisi. Mano a mano che il liquido evapora cresce la pressione o tensione del vapore, però solo fino ad un limite quando lo spazio è saturo, o, come più spesso si dice, il vapore è *saturo;* in modo che se c'è ancora del liquido presente, questo non evapora ulteriormente. La tensione raggiunta dal vapore in tali condizioni si dice *tensione massima* o *tensione del vapor saturo*, e dipende solo dalla natura del liquido e dalla temperatura e non dal fatto che l'ambiente sia inizialmente vuoto o occupato da un altro aeriforme, nè dal volume concesso al vapore.

Un vapore *non saturo* si dice anche *secco* o *soprariscaldato.* In tali condizioni il vapore segue approssimativamente la legge di Boyle e Mariotte e quella di Gay-Lussac.

103. Tensione massima del vapore d'acqua. — Per l'importanza che ha la questione nello studio di molti fenomeni, crediamo opportuno di riferire i valori della tensione massima del vapor d'acqua a diverse temperature. Accurate determinazioni furono fatte dal Régnault, che estese le sue ricerche da -30° a 130°, e i risultati sono raccolti in tabelle che sono riportate in tutti i Testi di Fisica di una certa estensione. Noi ci limitiamo qui a riportare pochi dati.

Temperature in centigradi	Tensione in mm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in mm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in mm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in cm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in cm. di mercurio
— 20	0,96	45	71,66	120	1488,9	200	1162,5	290	5867
— 15	1,45	50	92,30	130	2025,6	210	1426	300	6762
— 10	2,16	55	117,85	140	2709,5	220	1738	310	7750
— 5	3,17	60	149,19	150	3568,7	230	2078	320	8834
0	4,58	65	187,36	160	4633	240	2517	330	10022
5	6,54	70	238,53	170	5937	250	2995	340	11383
10	9,21	75	289,0	180	7514	260	3576	350	12692
15	12,78	80	355,1	190	9404	270	4337	360	14187
20	17,51	85	433,5	200	11647	280	5060		
25	23,69	90	525,8						
30	31,11	95	634,0						
35	42,02	100	760,0						
40	55,13	110	1074,5						

Da questa tavola si constata che la tensione massima del vapor d'acqua, quasi nulla a 0°, diventa 1 atmosfera a 100°; 2 atmosfere a 120°; 3 atmosfere verso i 135°; 5 atmosfere poco sopra a 150°; 10 atmosfere a 180°; 16 atmosfere a 200°; 20 atmosfere a 215° circa.

104. Tensione massima di altri vapori.

Temperatura in centigradi	Alcool etilico mm. di mercurio	Etere solforico mm. di mercurio	Temperatura in centigradi	Anidride carbonica (atmosfere)
0	12,6	184,9	0	34,3
10	23,8	291,8	5	39,0
20	44,0	442,4	10	44,2
30	78,2	647,0	15	50,0
40	134	921,2	20	56,3
50	221	1276,1	25	60,3
60	350	1728	30	70,7
70	542	2294	31,35	72,9
80	812	2991		
90	1188	3840		
100	1695	4859		

105. Ebollizione. — Se si riscalda gradualmente un liquido in un recipiente aperto, da principio avviene l'evaporazione soltanto alla superficie, e a un certo momento *la temperatura cessa di salire* e avviene l'*ebollizione*, cioè *una produzione di bolle di vapore in seno al liquido.*

Il fenomeno è regolato dalle seguenti leggi:

1° *Sotto una data pressione, l'ebollizione ha luogo a una temperatura determinata, costante per ciascun liquido.*

Questa temperatura si chiama *punto di ebollizione.* Il punto di ebollizione è detto *normale* sotto la pressione di 76 cm. di mercurio. Ecco alcuni punti di ebollizione normali:

Elio	— 268°,7	Anidride carbonica .	— 78,4
Idrogeno	— 252,6	Anidride solforosa . .	— 10
Azoto	— 195,6	Etere etilico	— 34,6
Ossigeno	— 183	Alcool assoluto . . .	— 78,25

Acqua	100°	Cadmio	766
Fosforo bianco . .	280,5	Zinco	918
Mercurio	356,8	Ferro	2450
Zolfo (monoclino) .	444,5	Tungsteno	3360

2° *Durante l'ebollizione*, malgrado la somministrazione di calore operata dalla sorgente, *la temperatura del liquido rimane costante*, se la pressione non varia.

Queste due leggi si possono verificare con un termometro.

3° *L'ebollizione di un liquido si produce quando esso possiede tale temperatura alla quale il suo vapore saturo acquista una tensione eguale alla pressione soprastante.*

106. Influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione. — In virtù della terza legge dell'ebollizione un liquido bolle a temperature diverse al variare della pressione e precisamente la temperatura varia in senso diretto della pressione. Limitiamoci a qualche esperienza sull'acqua.

Fig. 201.

Prendiamo un pallone di vetro *B* pieno per circa $\frac{1}{3}$ d'acqua (fig. 201), e facciamola bollire per qualche tempo finchè il vapore abbia scacciato tutta l'aria. Mentre l'acqua bolle, tappiamolo e capovolgiamolo, immergendone la bocca in una vasca d'acqua. L'ebollizione cessa, ma se poi raffreddiamo in un modo qualunque la parte superiore del pallone, versandovi sopra dell'acqua fredda, vediamo che l'acqua ricomincia a bollire. Ciò

avviene perchè il raffreddamento del pallone produce la condensazione di una parte del vapore e una conseguente diminuzione della pressione sull'acqua.

Sempre in virtù della terza legge dell'ebollizione si può desumere la temperatura di ebollizione dell'acqua sotto una determinata pressione, ricorrendo alla tabella che dà la tensione massima del vapor d'acqua alle varie temperature (103).

Così, ad esempio, sul Monte Bianco, dove la pressione media è di circa 42^{cm}, il Tyndall nell'agosto 1859 trovò che l'acqua bolliva a 84°,97.

In media per un elevamento di 324 m. corrisponde l'abbassamento di 1° nella temperatura di ebollizione dell'acqua; di guisa che dalla temperatura alla quale l'acqua bolle, si può approssimativamente dedurre l'altezza del luogo di osservazione.

Per contro, esercitando sull'acqua una pressione superiore a 76 cm., il punto di ebollizione si eleva sopra 100°. Ciò si dimostra colla *pentola di Papin* (fig. 202); essa consiste in un robusto recipiente di bronzo, contenente acqua, chiuso ermeticamente da un coperchio premuto con una vite contro l'apertura superiore. Questo coperchio porta una *valvola di sicurezza*, cioè una specie di tappo poggiante sopra un foro del coperchio, premutovi da un contrappeso che si può spostare sopra una leva di 2° genere.

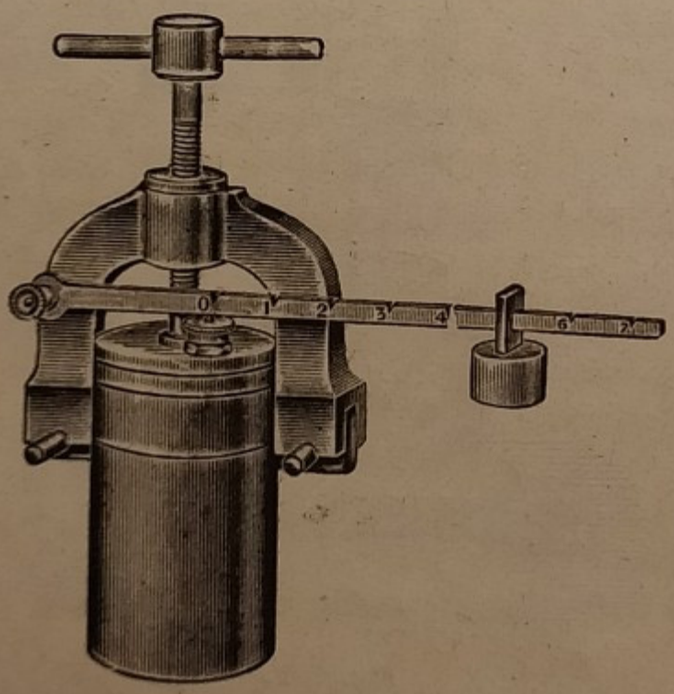


Fig. 202.

Riscaldando l'acqua, aumenta rapidamente la pressione del vapore, finchè ad un certo momento la valvola si apre. Da quell'istante la pressione non potendo aumentare, resta immutata anche la temperatura raggiunta dall'acqua, e questa temperatura assumerà dei valori più o meno elevati al disopra

di 100° secondo che, regolando la valvola, il vapore potrà assumere una pressione più o meno alta sopra i 76 cm.

Se si regola la valvola in modo che il vapore possa raggiungere 5 atmosfere, la temperatura dell'acqua si fissa verso i 150° (103).

A queste temperature elevate l'acqua ha un potere dissolvente assai maggiore che a temperature più basse. Perciò industrialmente tali apparecchi col nome di *digestori* sono usati per l'estrazione della gelatina dalle ossa, e col nome di *autoclavi* sono impiegati per sterilizzare. Di piccoli autoclavi si giovano i farmacisti per sterilizzare le fialette per iniezioni ipodermiche.

107. Calore di vaporizzazione. — Nello stesso modo che per operare la fusione di un corpo occorre consumare del calore per vincere la coesione molecolare, altrettanto avviene nella evaporazione. E si dice *calore di vaporizzazione* di un liquido ad una certa temperatura il numero di piccole calorie necessarie per trasformare allo stato di vapor saturo un grammomassa del liquido senza cambiamento di temperatura. Per l'acqua il calore di vaporizzazione è elevatissimo, avendo, a 100°, il valore di 538 circa. In conseguenza quando il vapor d'acqua si condensa si ha uno sviluppo di calore nella stessa misura.

Il fenomeno è largamente utilizzato per il riscaldamento a vapore, e in particolare nei caloriferi a vapore (124).

108. Liquefazione - Temperatura critica. — La liquefazione è il passaggio di un aeriforme allo stato liquido.

Tutti gli aeriformi possono essere liquefatti, occorre però conoscerne la *temperatura critica*. Verso la metà del secolo passato diversi Fisici si occuparono della liquefazione dei gas; da notare il Faraday, che fin dal 1845 arrivò a liquefare tutti i gas allora conosciuti, tranne i sei seguenti: *idrogeno*, *ossigeno*, *azoto*, *ossido di carbonio*, *biossido di azoto* e *metano*. Tali gas vennero in quell'epoca chiamati gas *permanenti*.

L'Andrews nel 1869, dopo una serie di ricerche sistematiche sul comportamento dei gas facilmente liquefacibili, e in particolar modo sull'anidride carbonica, riuscì a scoprire che *ogni aeriforme possiede una temperatura caratteristica*, detta

temperatura critica, al di sopra della quale la sostanza non può esistere che allo stato gasoso.

Ciò spiega perchè i gas sopra nominati avevano resistito a temperature di —100° e alla pressione di parecchie centinaia di atmosfere; essi infatti possiedono temperature critiche inferiori a —100°. Talchè, se si vuol liquefare un gas, occorre prima portarlo a temperatura non superiore alla critica, meglio al di sotto, e comprimerlo convenientemente. Quanto più bassa è la temperatura cui il gas è portato, tanto minore è la pressione che occorre esercitarvi per liquefarlo.

Si chiama poi *pressione critica* di un gas la pressione alla quale occorre portare il gas per liquefarlo quando possiede la temperatura critica. Temperatura critica e pressione critica si chiamano *costanti critiche*. Alcuni valori sono riportati nella tabella che segue:

	Temperatura critica in centigradi	Pressione critica in atmosfere		Temperatura critica in centigradi	Pressione critica in atmosfere
Azoto	—147,3	33,49	Anidride carbonica . .	31	73,05
Biossido di azoto	— 93,5	71,2	Ossido di carbonio . . .	—138,7	34,6
Elio	—268,1	2,75	Gas ammonico	132,9	112,30
Idrogeno . . .	—239,91	12,80	Etilene . . .	9,5	50,65
Ossigeno	—118,8	49,71	Anidride solforosa . . .	157,15	77,65
Acqua	364,3	194,6	Metano . . .	— 82,85	45,6

Da un esame anche sommario di questa tabella possiamo scorgere che ci sono dei gas *facilmente*, altri *difficilmente* liquefacibili. Chiameremo facilmente liquefacibili quelli che hanno temperatura critica superiore a 0° o non molto inferiore; e difficilmente liquefacibili quelli che hanno temperatura critica molto bassa.

Nella tabella sono notati insieme con alcuni gas comuni anche dei liquidi; non deve sorprendere il fatto.

Dalla tabella si rileva, ad esempio, che l'acqua ha una temperatura critica di 364°,3; ciò significa che al disopra di 364°,3 l'acqua può esistere soltanto allo stato gassoso.

I processi, dunque, messi in opera per la liquefazione degli aeriformi sono diretti a portare l'aeriforme al disotto della temperatura critica e a comprimerlo convenientemente.

Non possiamo esporre i processi adoperati nei laboratori scientifici e nell'industria per liquefare i gas. I gas, diremo così, liquefatti servono nei laboratori per ottenere delle basse temperature che rasentano lo zero assoluto (85), alle quali avvengono degli interessantissimi fenomeni; nell'industria i gas liquefatti servono a svariati scopi come accenneremo più sotto.

109. Freddo prodotto dall'evaporazione di un liquido. — Dicevamo che un liquido consuma del calore per evaporare (107) si capisce quindi che costringendo un liquido ad evaporare, senza somministrargli calore dall'esterno, esso dovrà, sottraendo del calore a se stesso e ai corpi circostanti, produrre un raffreddamento. Molti fatti comuni lo provano: il sudore dà un senso di fresco, perciò si somministrano ai febbricitanti dei medicinali che provocando il sudore abbassano la temperatura; agitando una mano bagnata nell'aria si ha una sensazione di freddo, ecc.

Gli *alcarazaz* (fig. 203) sono recipienti in terracotta, non verniciata e abbastanza porosa. Riempiti d'acqua, questa trasuda e mantiene costantemente umida la superficie esterna, dimodochè l'evaporazione mantiene fresca l'acqua interna.

In una provetta *A* (fig. 204) si pone qualche po' d'etere solforico, nel quale pesca una provetta più piccola *B* contenente dell'acqua.

Mediante un cannello *C* si fa gorgogliare attraverso l'etere una forte corrente d'aria, che ne determina la rapida evaporazione; dopo un po' di tempo nella provetta *B* si trova l'acqua gelata.

Sotto una campana pneumatica si pone una vaschetta di vetro *V* (fig. 205) contenente dell'acido solforico concentrato, e sopra questa, sostenendovela con un telaio metallico, una

capsula *A*, fatta di sostanza cattiva conduttrice, scavandola, ad esempio, in un pezzo di sughero, nella quale si pone un po' d'acqua. Messa in azione la macchina pneumatica, l'acqua eva-

Fig. 203.

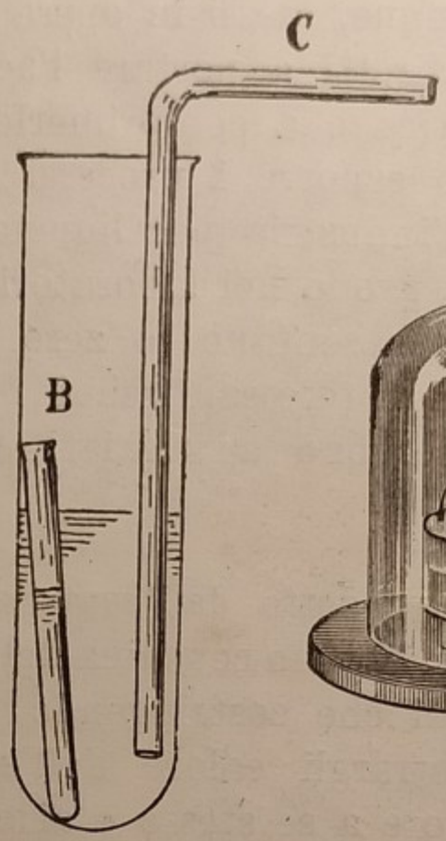


Fig. 204.

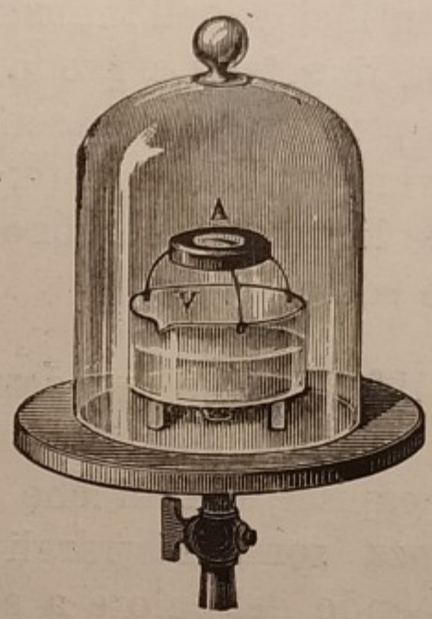


Fig. 205.

pora rapidamente per effetto della bassa pressione e perchè i vapori vengono, man mano che si formano, assorbiti dall'acido solforico. Dopo pochi minuti l'acqua entra in ebollizione per effetto della bassa pressione e gela per il raffreddamento prodotto dalla rapida evaporazione.

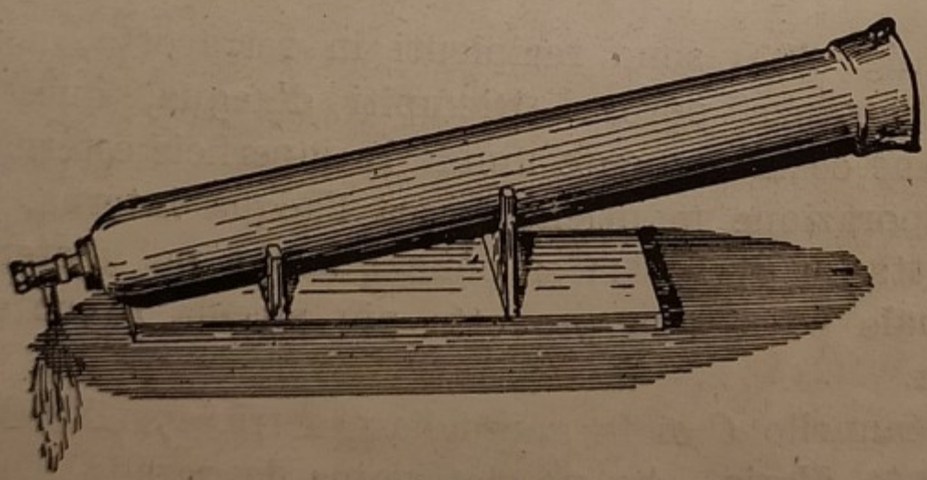


Fig. 206.

Ma la sostanza che, almeno per dimostrazioni scolastiche, serve ad ottenere con grande facilità delle temperature discretamente basse, è l'anidride carbonica che si trova in commercio liquefatta in bombole. La bombola (fig. 206) si dispone incli-

nata sul tavolo di guisa che l'orifizio d'uscita della sostanza sia coperto dal liquido. Se si apre il robinetto si vede uscire un getto rumoroso e fumante che svanisce subito nell'aria. Avviene che in seguito al brusco salto di pressione da qualche decina di atmosfere a una atmosfera, il liquido non appena si affaccia all'orifizio evapora istantaneamente, producendo un notevole raffreddamento, sì che una parte della sostanza passa allo stato solido; il getto bianco che vediamo uscire dalla bombola è infatti un getto gassoso che tiene in sospensione innumerevoli fiocchetti di anidride carbonica *solida*. Per raccogliere la sostanza si dirige il getto dentro una scatola di legno fatta di due parti, rientranti l'una nell'altra (fig. 207), sì che il getto entrando per *A*, si frange dentro la scatola contro una lamina *C* che fa come da schermo al canale opposto *B*. La sostanza solida si raccoglie in gran parte nella scatola, e il gas, passando dietro lo schermo *C*, esce da *B*.

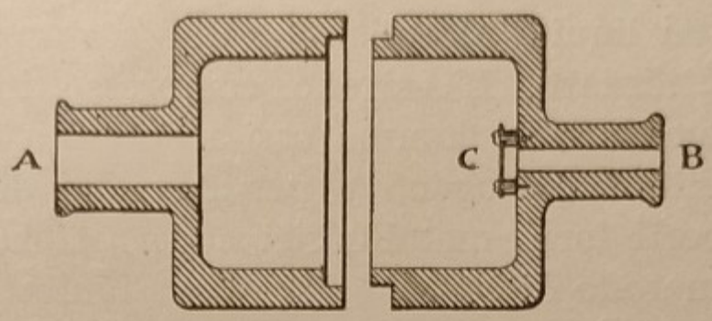


Fig. 207.

Così, dopo pochi secondi, smontata la scatola, la si trova piena di una bella sostanza candida come la neve, che si dice appunto *neve carbonica*.

Tale neve, versata sul tavolo, la si vede lentamente sparire, perchè sublima a spese del calore dell'ambiente e proprio, mantenendosi ad una temperatura di circa -60°; e in breve tempo si vede la massa bianca ricoperta di uno strato di brina, dovuta alla solidificazione del vapor d'acqua atmosferico.

Se si mescola la neve carbonica con etere, si ha un miscuglio frigorifero, detto *pasta di Thilorier*, la cui temperatura può raggiungere da -80° a -90°.

A tali temperature è possibile mostrare in lezione con grande facilità fenomeni di congelazione assai interessanti.

110. Usi industriali dei gas liquefatti. — Vengono oggi liquefatti su larga scala alcuni gas, particolarmente l'aria e l'anidride carbonica.

L'aria liquida è un miscuglio di azoto e di ossigeno liquidi, ma il primo avendo una temperatura di ebollizione più bassa dell'ossigeno lo si può separare da questo, con un processo di distillazione analogo a quello in uso per separare l'alcool dai liquidi alcoolici. Le due sostanze vengono separatamente utilizzate. L'ossigeno compresso in bombole serve per alimentare la fiamma ossi-acetilenica che si adopera per la saldatura autogena e per il taglio dei metalli, per alimentare certi forni metallurgici e per ottenere l'anidride solforica col metodo di contatto. È anche limitatamente usato in medicina.

L'azoto è usato per preparare alcuni concimi azotati e per ottenere l'acido nitrico.

L'anidride carbonica si trova pronta in commercio, liquida, in bombole di acciaio e si adopera per la preparazione delle acque gassose.

Igrometria.

111. Umidità dell'aria. — L'aria contiene sempre del vapor d'acqua. Esso proviene dall'evaporazione degli oceani e dei mari, la cui superficie è circa quadrupla di quella delle terre emerse. Sorgente secondaria è l'evaporazione dai laghi, dai fiumi, dal suolo umido, dagli organismi, specialmente dalle piante.

Occorre notare che l'evaporazione si compie a tutte le temperature e avviene dall'acqua sia allo stato liquido, sia allo stato solido: neve e ghiaccio.

L'evaporazione è minore nei laghi alpini che non in quelli pedemontani, e cresce col diminuire della latitudine; così la evaporazione media annua nel lago di Costanza è di 80 cm., nel lago di Garda 120 cm., nel Trasimeno 130 cm.

In determinate condizioni il vapor d'acqua atmosferico *precipita*, ossia si trasforma in acqua liquida o in ghiaccio.

Agli scopi meteorologici è importantissimo lo studio del vapor d'acqua contenuto nell'aria, o, per dir meglio, la determinazione dell'*umidità atmosferica*. E qui occorre subito precisare il significato di umidità: l'aria è più o meno umida non solo in relazione alla massa assoluta m di vapore contenuto

in un metro cubo, ma anche in relazione alla temperatura alla quale l'aria si trova. Dimodochè, se m è la massa di vapor d'acqua contenuta in un dato istante in un metro cubo d'aria ed M è la massa di vapore che alla stessa temperatura renderebbe saturo lo stesso volume d'aria, l'aria è tanto più umida quanto più m si avvicina ad M, sì che una leggera diminuzione di temperatura potrebbe provocare la saturazione.

Stato igrometrico dell'aria è detto il rapporto tra m ed M ed *umidità relativa* dell'aria il prodotto dello stato igrometrico per 100. Se quindi l'aria fosse assolutamente umida lo stato igrometrico $\frac{m}{M}$ sarebbe eguale ad 1, e l'umidità relativa eguale a 100; in caso di aria completamente secca sarebbe $\frac{m}{M} = 0$ e l'umidità relativa pure zero. Lo stato igrometrico dell'aria si misura con gli *igrometri*, il più semplice dei quali è il *psicrometro*.

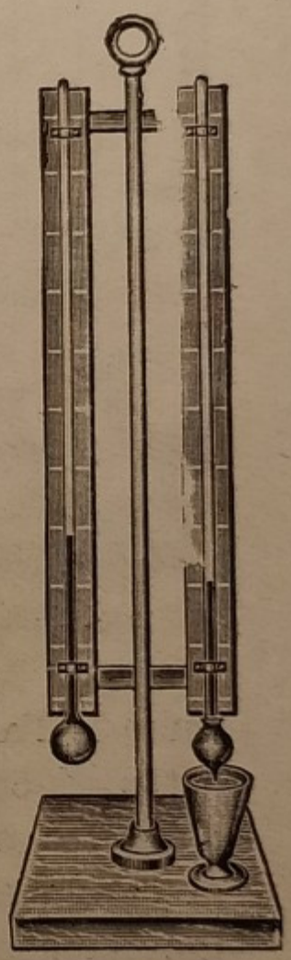


Fig. 208.

112. Psicrometro. — Questo strumento è formato di due termometri identici sospesi vicini, divisi in decimi o almeno in quinti di grado, uno dei quali ha il bulbo coperto con una pezzuola di mussola che viene bagnata con acqua distillata (fig. 208). In tal modo l'evaporazione dell'acqua che imbeve la pezzuola determina un abbassamento di temperatura del termometro *bagnato*, il quale d'altra parte riceve calore dall'ambiente. Così avviene che ad un certo momento il calore sottratto dall'evaporazione è esattamente compensato da quello che il termometro riceve dall'ambiente, e il termometro assumerà una temperatura di regime t', che, come si intuisce, sarà tanto più bassa della temperatura t dell'ambiente, segnata dal termometro *asciutto*, quanto più attiva risulterà l'evaporazione dell'acqua dalla pezzuola, ossia quanto minore sarà l'umidità dell'aria.

Apposite tavole dànno senz'altro lo stato igrometrico dell'aria in base ai valori t e t'.

113. Igroscopî. — S'incontrano spessissimo anche fuori dei laboratori, degli strumenti che non possono aspirar all'ufficio di veri e propri igrometri, perchè dànno solo e con frequenti incertezze, un'idea della maggiore o minore umidità dell'aria.

L'*igroscopio a capello* di Saussure (fig. 209) è costituito di un telaio di legno o di metallo nel quale è teso un capello preventivamente digrassato, fisso ad un estremo, in *d*, e di cui l'altro estremo si avvolge sopra una piccola puleggia *O*, solidale con un indice. Il capello all'estremo inferiore è caricato di un piccolo peso *p*. Nell'aria umida il capello si allunga, con che l'indice si muove su di un arco di cerchio in un certo senso; il contrario avviene con l'aria secca. L'arco è diviso in 100 parti eguali, segnando 0 e 100 rispettivamente nelle posizioni occupate dall'indice, dopo che lo strumento è stato lasciato per lungo tempo entro un recipiente con calce viva e poi in un altro con le pareti mantenute costantemente bagnate; le indicazioni dell'apparecchio sono soggette a diverse cause di errore.

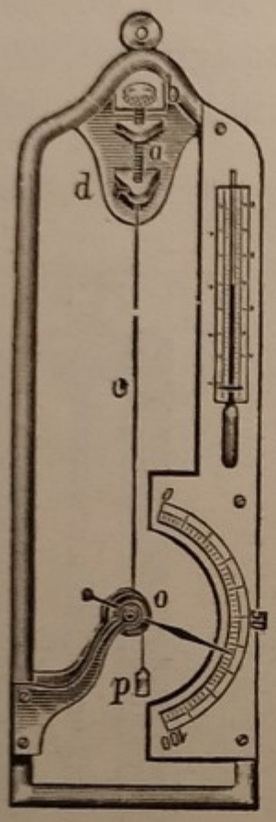


Fig. 209.

Talora s'incontrano degli igroscopî fatti con una figurina di cartone che presenta qualche movimento al variare dell'umidità, per esempio, un frate il cui cappuccio s'innalza quando l'aria diventa umida, ecc. In tali casi si usa un pezzetto di corda da violino di minugia con un estremo fisso e coll'altro unito alla parte mobile della figura, nel caso citato al cappuccio del frate. In tal modo il cappuccio assume un movimento in un senso o nell'altro per la proprietà che hanno le corde di minugia di svolgersi o di avvolgersi su se stesse secondo che l'umidità dell'aria aumenta o diminuisce.

Cenni di Termodinamica.

114. Trasformazione reciproca del lavoro e del calore; primo principio della Termodinamica. — La *Termodinamica*, divenuta ora una Scienza per la grande importanza che ha assunto nel

campo industriale, si occupa della trasformazione reciproca del lavoro meccanico e del calore e delle applicazioni che hanno questi fenomeni nell'industria. L'energia meccanica può talvolta sparire in seguito agli attriti e alla imperfetta elasticità dei corpi; in tali casi all'energia meccanica venuta meno corrisponde la produzione di una certa quantità di calore.

L'americano Rumford, trovandosi nel 1798 a Monaco di Baviera per dirigere la costruzione di alcuni cannoni, restò veramente impressionato della quantità enorme di calore che si sviluppava durante la perforazione. In una memoria pubblicata verso quell'epoca, il Rumford espone chiaramente l'idea che il lavoro meccanico, impiegato a vincere l'attrito, si trasformava in calore.

I lavori di Mayer, Hirn, Joule, Helmoltz, Clausius ed altri compiuti nella prima metà del secolo passato, dai quali risulta anche che il calore può trasformarsi in lavoro meccanico, servirono a concretare le idee di Rumford, e fu così fondata la *Termodinamica*, il cui *1° principio* detto anche *principio dell'equivalenza o di Mayer*, afferma che *nella trasformazione del lavoro meccanico in calore ad una determinata quantità di lavoro impiegato corrisponde sempre una determinata quantità di calore prodotto, e inversamente.*

A proposito di queste trasformazioni citeremo dei fatti comuni. Un pezzo di ferro battuto violentemente si riscalda e può diventare rovente; una palla di piombo lanciata da un'arma da fuoco contro un muro resistente, può scaldarsi al punto da entrare in fusione.

Si sa che un succhiello che fora il legno, una sega in azione, un freno serrato contro una ruota d'una vettura, si riscaldano. Due pezzi di legno strofinati l'uno contro l'altro si carbonizzano e possono anche infiammarsi; così si accendono i fiammiferi strofinandoli; due pezzi di ghiaccio strofinati in un ambiente a 0°, entrano in fusione.

Come prova scolastica riferiamo l'esperienza di Tyndall (fig. 210) nella quale si fa ruotare un tubo di ottone pieno di etere solforico, stringendolo moderatamente dentro una morsetta di legno. Il lavoro meccanico eseguito dal braccio dello sperimentatore o da un motore, se si ricorre a questo mezzo

per vincere l'attrito, si converte in calore, che fa aumentare la tensione del vapor d'etere al punto da far saltare a distanza il tappo che chiude il tubo.

L'*acciarino pneumatico*, lo stesso tubo di vetro munito di stantuffo che ci ha già servito per dimostrare la comprimibilità dell'aria (4), può ora servirci per dimostrare che il lavoro speso per operare una brusca compressione dell'aria, sviluppa

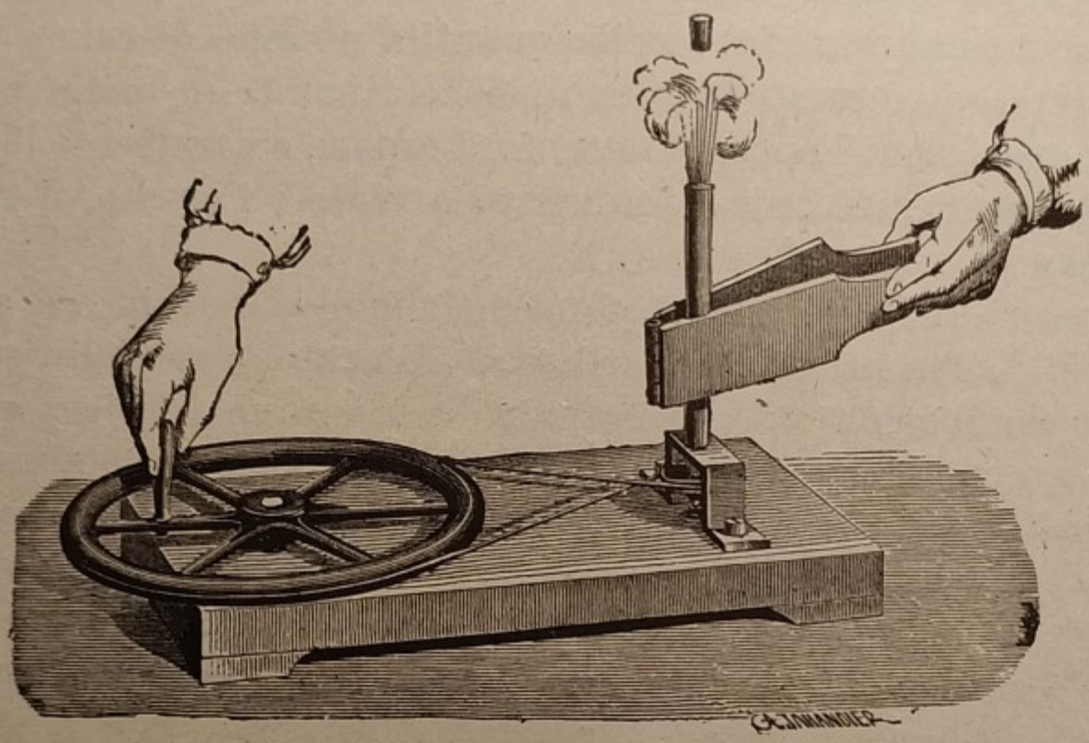


Fig. 210.

visibilmente del calore. Basta infatti fissare sotto la base dello stantuffo del detto apparecchio un po' d'esca; premendo con un colpo violento della mano lo stantuffo, l'aria compressa si riscalda al punto di accendere l'esca.

Non diverso è il fenomeno delle stelle cadenti, che venendo verso la Terra con grande velocità urtano violentemente contro l'atmosfera e s'accendono.

115. Equivalente meccanico della caloria. — Numerose esperienze vennero eseguite dai Fisici per determinare il così detto *equivalente meccanico della caloria*, vale a dire il numero di chilogrammetri o di joule necessari per produrre una caloria.

La prima determinazione venne fatta dal tedesco Mayer e secondo altri dall'inglese Joule. I risultati ottenuti anche con

prove posteriori sono stati assai concordanti, in modo che l'equivalente meccanico della grande caloria si ritiene eguale a 427 kgm.

116. Ritorno al principio della conservazione dell'energia. — Comprendiamo ora meglio quanto è detto nel § 38 sulla trasformazione e la conservazione dell'energia. L'energia meccanica di un corpo può spesso sparire, com'è il caso di un corpo che cadendo da una certa altezza, batte contro il suolo, rimbalza e vi rimane immobile. Per caricare il nostro orologio da tasca spendiamo del lavoro muscolare per comunicare alla molla motrice un'energia potenziale, che nelle 24 ore successive si converte lentamente in cinetica nel moto del bilanciere e delle ruote. Ma quando il corpo è fermo sul suolo e quando la molla è scarica non si ha in realtà alcuna perdita di energia, perchè all'energia meccanica venuta meno, corrisponde la produzione di una certa quantità di calore. Negli esempi citati il calore generato può sfuggire anche alle più accurate misure, ma le osservazioni e le esperienze citate nel paragrafo precedente mettono ben in chiaro la trasformabilità dell'energia meccanica in calore.

In altre numerose circostanze riscontriamo anche la trasformazione del calore in energia meccanica — nei motori termici —; dell'energia meccanica in energia elettrica e reciprocamente; dell'energia elettrica in calore, ecc. Insomma le diverse forme di energia possono sempre trasformarsi l'una nell'altra, ed eseguendo delle opportune misure, si è constatato che in qualunque trasformazione, ossia in qualunque fenomeno, che è sempre una trasformazione di energia, mai si verifica che la minima quantità di energia possa risultare distrutta o venire dal nulla.

Motori termici e macchine refrigeranti.

I *motori termici* trasformano industrialmente il calore in lavoro meccanico. Daremo un cenno: 1° delle *macchine a vapore*; 2° dei *motori a scoppio*. Le *macchine refrigeranti* servono a ottenere il freddo artificiale.

117. Macchine a vapore. — Ogni macchina a vapore consta di tre parti: *caldaia*, *cilindro* e *condensatore* o *refrigerante*.

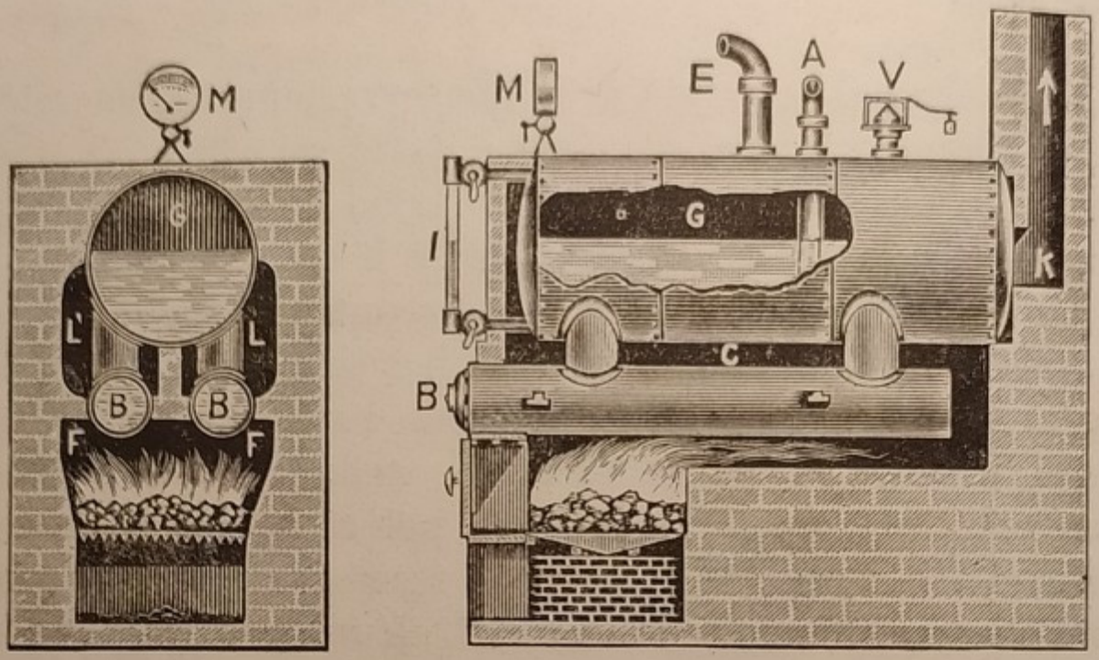


Fig. 211.

La *caldaia* è un recipiente che può resistere a pressioni più o meno elevate, ordinariamente da 5 a 20 o più atmosfere, contenente dell'acqua che viene evaporata a spese del calore sviluppato dal combustibile. Per utilizzare nel miglior modo il calore si sono studiate per la caldaia disposizioni che hanno sopratutto lo scopo di presentare una grande superficie esposta alla fiamma e ai gas caldi della combustione. A tale scopo sono meglio indicate le caldaie tubulari delle quali si può avere un'idea dando uno sguardo alle figure 211, 212 e 213.

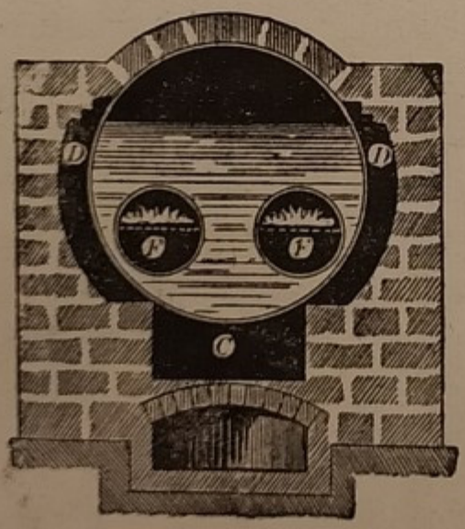


Fig. 212.

In tutti i casi la caldaia è munita di accessori, che ne permettono il buon funzionamento e ne prevengono la esplosione.

Tra questi notiamo l'indicatore di pressione o *manometro*; la *valvola di sicurezza*, che abbiamo incontrata nella pentola di Papin (106); l'*indicatore di livello*, che è un tubo in vetro posto fra due tubulature metalliche che comunicano l'una

colla regione della caldaia occupata dall'acqua, l'altra con quella occupata dal vapore; in questo modo al macchinista risulta in ogni istante visibile l'altezza dell'acqua in caldaia. Tale indicatore ha un'importanza massima, dappoichè, se l'acqua scendesse in caldaia a un livello troppo basso, le pareti scoperte, a contatto del fuoco si arroventerebbero, e si avrebbe

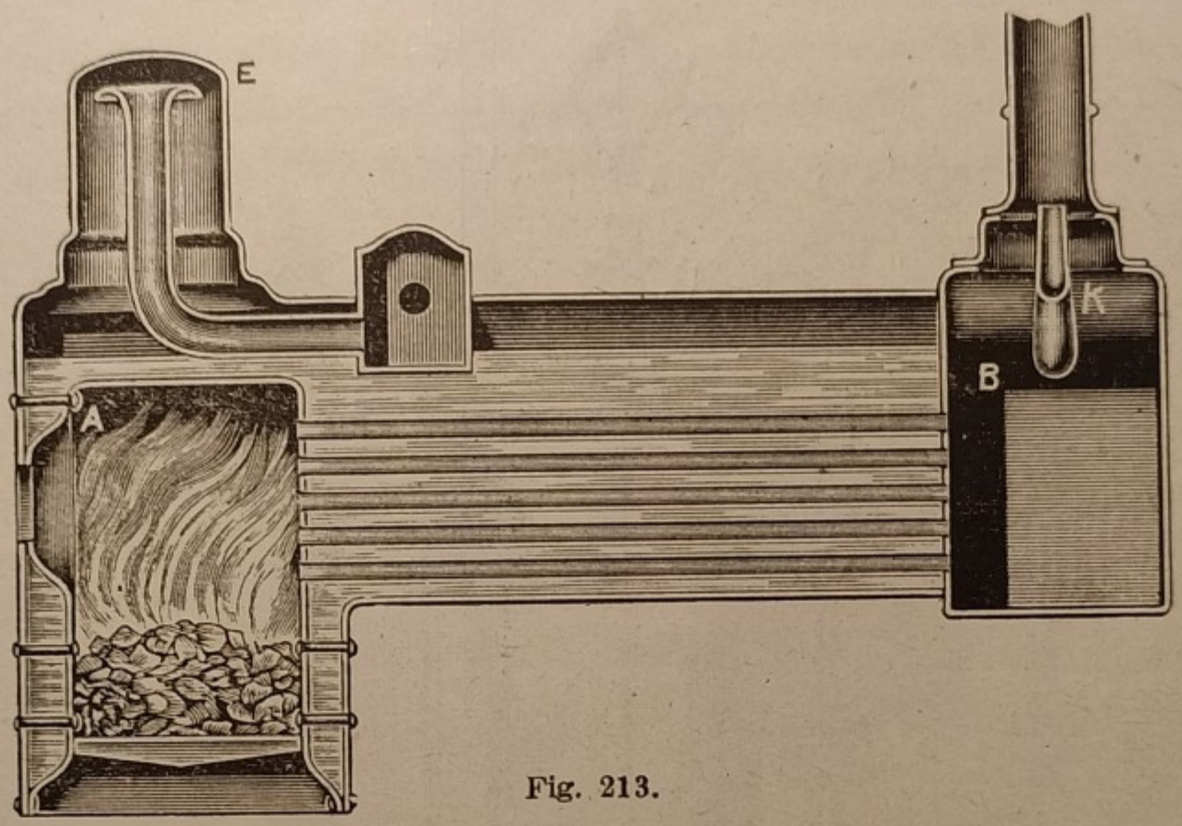


Fig. 213.

la produzione d'una grande quantità di vapore al momento di una nuova introduzione d'acqua, che potrebbe determinare l'esplosione della caldaia.

Oltre agli accessori indicati, una caldaia è sempre accompagnata da *apparecchi di alimentazione*, una pompa che la macchina stessa mette in movimento, o talora un *iniettore*, sulla struttura del quale non crediamo opportuno di parlare.

118. Cilindro. — È l'organo dove, per mezzo del vapore proveniente dalla caldaia, si compie la trasformazione del calore in lavoro.

Il cilindro è un corpo di pompa a pareti robuste *A* (fig. 214), nel quale può scorrere a perfetta tenuta uno stantuffo *C*, interamente metallico, che per la pressione del vapore può assumere un moto alternativo di va e vieni. L'asta dello stantuffo, che

passa attraverso a una base del cilindro con un dispositivo che permette la tenuta del vapore, è impegnata con un giunto articolato alla *biella P* e questa alla sua volta con la *manovella Q* che è rigidamente fissata all'*albero principale* della macchina. Con

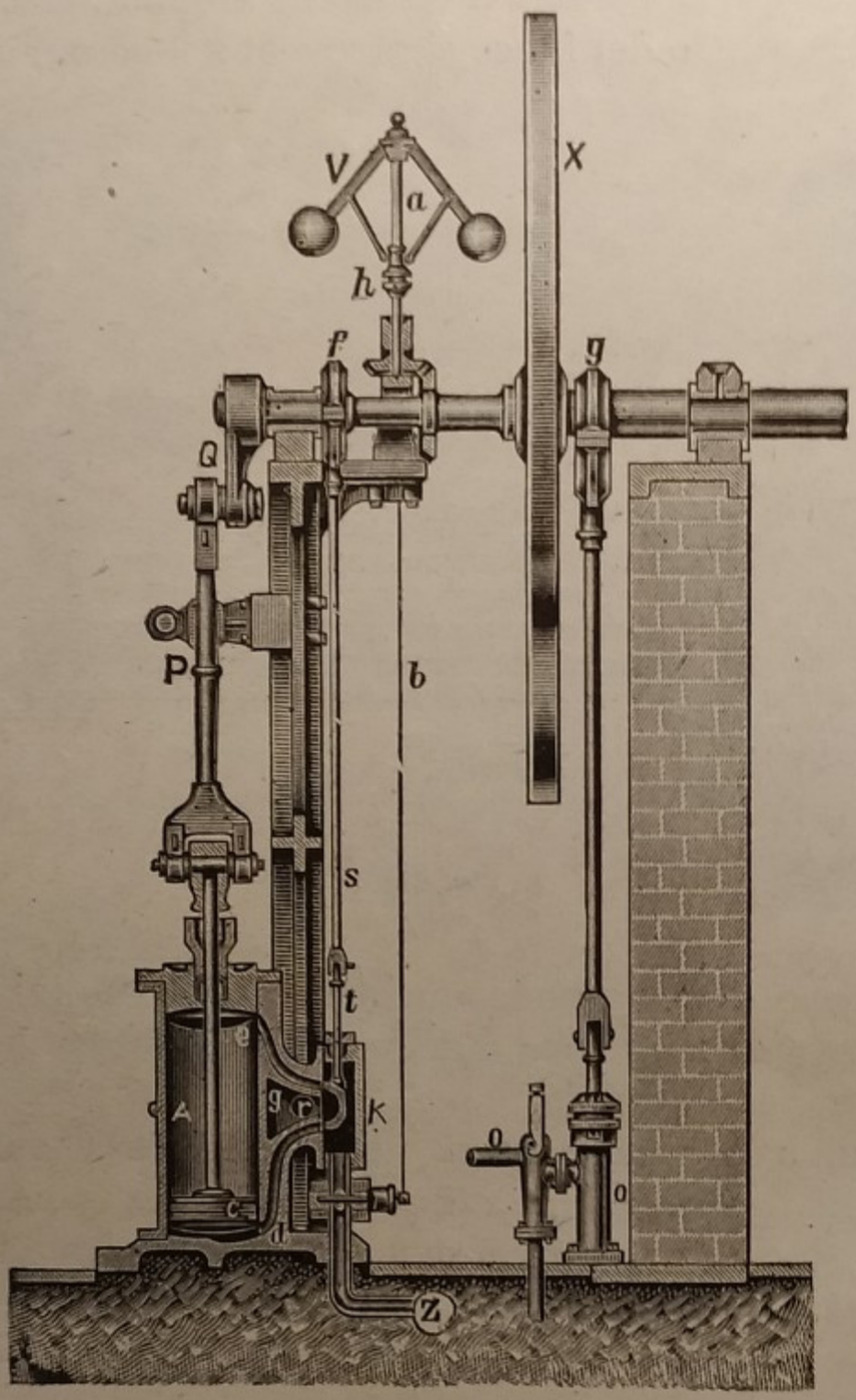


Fig. 214.

tale sistema il moto rettilineo alternativo dello stantuffo viene trasformato in moto rotatorio dell'albero, che fa così un giro completo per ogni corsa di andata e di ritorno dello stantuffo.

L'albero, mediante cinghie od altri congegni, trasmette il moto, secondo il bisogno, alla macchina o ai congegni che de-

vono utilizzarlo, e per regolare tal moto una grande ruota *X*, detta *volano*, è fissata sull'albero principale.

Vediamo ora come agisce il vapore nel cilindro. Perchè lo stantuffo possa assumere il moto alternativo di va e vieni occorre aggiungere al cilindro degli organi *distributori* del vapore. Limitiamoci alla descrizione del distributore a *cassetto*, che è largamente usato. Il vapore arriva dalla caldaia per il tubo *Z* (fig. 214) e penetra in una scatola *K* fissata lateralmente al cilindro. In una delle facce di tale scatola, dalla

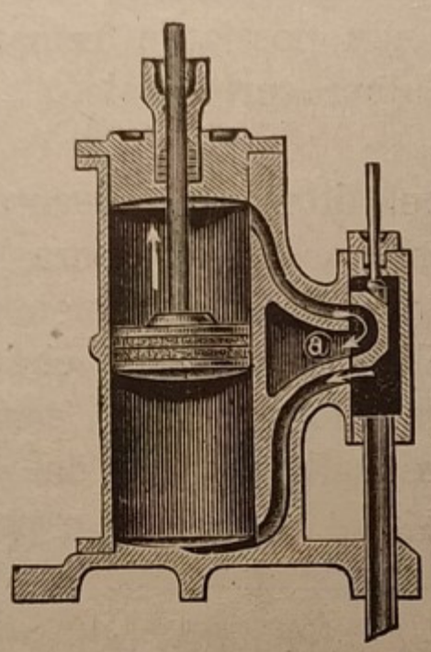


Fig. 215.

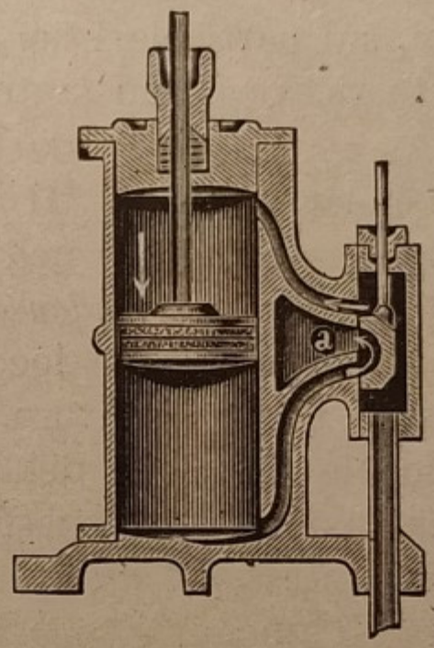


Fig. 216.

parte del cilindro, si aprono tre canali: due *e* e *d* finiscono verso le basi del cilindro internamente; il canale centrale *r* comunica col condensatore o coll'atmosfera. Sopra la detta faccia scorre con moto alternativo un cassetto, detto così perchè può addirittura paragonarsi a un cassetto ordinario, guidato da un'asta *t* che riceve un moto alternativo dall'albero principale della macchina.

Il cassetto, come apparisce meglio nelle figg. 215 e 216, è capace di coprire ad un tempo solo due delle aperture descritte. In tal modo quand'esso è nella posizione indicata dalla fig. 215 il vapore arriva nella parte inferiore del cilindro, lo stantuffo è sollevato, poichè il vapore che si trova sopra lo stantuffo è spinto attraverso il canale superiore nella cavità del cassetto e da questo, per il canale di mezzo, nel condensatore o nell'atmosfera.

Se allora il cassetto viene abbassato sì da coprire il foro centrale e quello inferiore (fig. 216), il vapore arriva sulla faccia superiore dello stantuffo, questo viene spinto in basso, e il vapore che gli sta sotto, per il canale inferiore attraverso la cavità del cassetto è ancora spinto nel condensatore o nell'atmosfera.

Da ciò si capisce che il moto alternativo dello stantuffo è comandato dal moto del cassetto; occorre perciò che questo compia il suo moto di va e vieni con una certa corrispondenza col moto dello stantuffo. Ed è appunto mediante un sistema di organi, sui particolari dei quali non possiamo fermarci, che il cassetto riceve il suo moto dall'albero principale.

119. Condensatore. — Il vapore, dopo aver lavorato nel cilindro, viene espulso o nell'atmosfera, e si ha allora lo *scappamento libero*, o nel *condensatore*. Si ha lo scappamento libero nelle locomotive e nelle locomobili, nei casi cioè che non si possa usare il condensatore. In tali condizioni la *contropressione*, cioè la pressione del vapore nella camera del cilindro in comunicazione coll'atmosfera, è di 1 atmosfera o poco più, e quindi la pressione *utile* è la pressione del vapore lavorante diminuita di uno.

Il condensatore è un recipiente ermeticamente chiuso, dentro o attorno al quale arriva costantemente dell'acqua fredda, sì che la sua temperatura è mantenuta piuttosto bassa. Il vapore che vi arriva vi si condensa ad una pressione che è la tensione massima del vapore alla temperatura del condensatore. Se questo è mantenuto a 50° la pressione interna è di cm. 9,23 (103), cioè di circa $^1/_8$ di atmosfera; tale dunque è la contropressione nelle circostanze indicate, sicchè la pressione utile è la pressione del vapore lavorante diminuita di $^1/_8$, con un *guadagno* di $^7/_8$ di atmosfera sopra il sistema a scappamento libero. L'acqua di condensazione viene continuamente asportata dal condensatore mediante una pompa e riportata in caldaia già abbastanza calda, ciò che costituisce un altro vantaggio del condensatore.

Ma quest'organo si può soltanto usare quando si ha a disposizione una grande massa d'acqua fredda, quindi non nelle

locomotive, le quali possono appena portare seco nel *tendere* l'acqua di alimentazione, nè nelle locomobili.

Il condensatore è usato nelle motrici fisse, e sempre nelle macchine marine, dove, come acqua refrigerante, serve l'acqua del mare.

120. Cenno sulle turbine a vapore o turbo-motori. — Nella macchina a vapore ordinaria occorrono, come s'è visto, degli organi intermediari per trasformare il moto alternativo dello stantuffo in moto rotatorio dell'albero principale; il funzionamento di tali organi richiede un consumo di energia, e in certi casi, quando, ad esempio, si richiedono grandi velocità di rotazione, come avviene nelle dinamo e nelle eliche delle navi, occorre aggiungere altri organi per la moltiplicazione dei giri, con che l'inutile consumo di energia diventa anche più grande. Si aggiunga a ciò che tale complicazione di organi intermediari diventa ingombrante e aumenta ancora lo spazio richiesto, che già è rilevante per la struttura stessa della motrice a cilindro. Tale fatto ha il suo peso particolarmente a bordo delle navi, dove l'economia dello spazio ha un'importanza grandissima.

Così si venne all'adozione dei turbo-motori, che portano delle ruote ad alette contro le quali vengono a urtare i getti di vapore che viene dalla caldaia. L'asse della ruota è lo stesso albero principale, che ne riceve così il moto direttamente. Le turbine non hanno volano, e hanno una grande velocità di rotazione, che consente di calettare senz'altro sull'albero motore l'organo rotante delle dinamo elettriche nelle officine termiche per la produzione della corrente, o l'elica della nave.

121. Rendimento d'una macchina a vapore. — Il rendimento di una macchina termica è misurato dal rapporto r fra la quantità di calore q effettivamente trasformato in lavoro e la quantità Q di calore assorbito dalla sorgente; è:

$$r = \frac{q}{Q}. \qquad (1)$$

Esso è praticamente assai basso. Infatti una buona macchina a vapore consuma 1 kg. di carbon fossile per cavallo-ora.

Tale quantità di carbone sviluppa 6500 grandi calorie, che, trasformate totalmente in lavoro, dovrebbero dare (115):

$$6500 \times 427 = 2.775.500 \text{ kgm.}$$

In realtà tale macchina, poichè ha la potenza di un cavallo-vapore, produce in un'ora, equivalente a 3600 secondi, il lavoro di:

$$75 \times 3600 = 270.000 \text{ kgm.}$$

ed ha perciò un rendimento che non arriva al 10 %.

Il fatto ha per la nostra Nazione un'importanza straordinaria; l'Italia non ha carboni fossili e deve con enorme spesa importarli dall'estero. Ma per fortuna l'Italia ha enormi riserve di *carbone bianco*, cioè riserve di energia idraulica. Molte cadute d'acqua sono già utilizzate, per altre si sta alacremente lavorando, di guisa che fra pochi anni l'enorme quantità d'energia delle nostre acque, trasportata a distanza mediante l'elettricità, basterà alle nostre officine e trascinerà i nostri treni, emancipandoci dal gravosissimo tributo che dobbiamo all'estero per l'importazione del carbon nero.

122. Motori a scoppio. — In questi motori, di costruzione recente, si utilizza per spingere lo stantuffo la forza dovuta all'esplosione di una miscela di vapore combustibile e di aria.

Ridotto alla massima semplicità, il motore a scoppio è costituito di un cilindro (fig. 217) nel quale è impegnato uno stantuffo *S*, che col solito sistema della biella e della manovella agisce sull'albero principale.

Prendiamo come esempio un motore monocilindrico a effetto semplice — la forza agisce solo sopra una faccia dello stantuffo — a *quattro tempi*, nel quale cioè il funzionamento avviene in quattro corse consecutive dello stantuffo, due d'andata e due di ritorno, corrispondenti a due giri completi dell'albero principale.

1° Tempo: *aspirazione* (fig. 217 *a*). Lo stantuffo *S* per effetto di forze esterne, cioè trascinato dal volano o dalla massa della macchina già in moto, aspira da un tubo *A* l'aria e il vapore combustibile, comunemente vapore di benzina.

2° Tempo: *compressione* (fig. 217 *b*). Sempre trascinato dal volano, lo stantuffo torna verso il fondo del cilindro e comprime la miscela esplosiva in uno spazio che sta sul fondo del cilindro detto *camera di esplosione*: i tubi *A* e *B* rimangono chiusi nel 2° tempo.

3° Tempo: *esplosione* (fig. 217 *c*). Una scintilla elettrica generata da un congegno particolare, detto *magnete*, fa esplo-

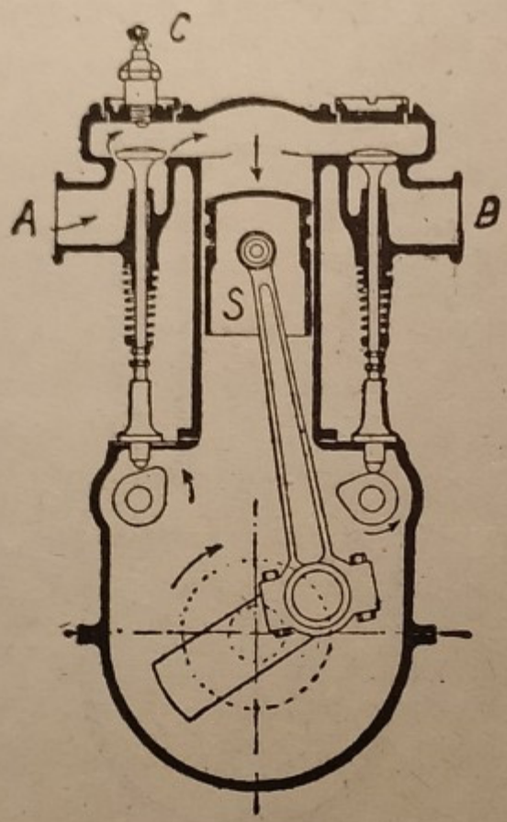


Fig. 217 *a*.

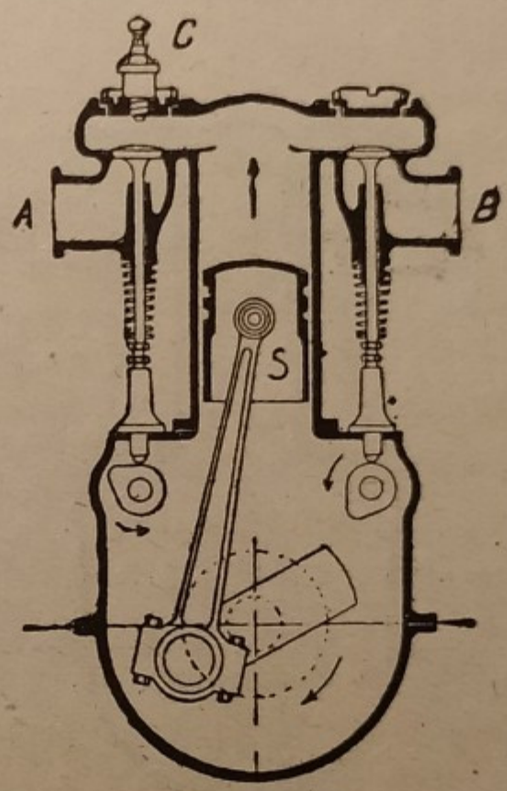


Fig. 217 *b*.

dere la miscela, e lo stantuffo, a mo' di un proiettile di un'arma da fuoco, viene violentemente allontanato dal fondo del cilindro.

4° Tempo: *espulsione* (fig. 217 *d*). Dalle stesse forze esterne lo stantuffo viene portato indietro, e i prodotti della combustione vengono espulsi dal tubo di scarico *B*.

Tutto sommato, durante il 1°, 2° e il 4° tempo, il motore riceve lavoro dalle forze esterne; il solo 3° tempo fornisce il lavoro motore; è quindi necessario munire il motore di un volano — negli automobili fa da volano tutta la massa del veicolo — capace di raccogliere durante il 3° tempo la forza viva necessaria, sia per compiere il lavoro al quale è destinato il motore, sia per far compiere allo stantuffo le altre tre corse semplici.

Le esplosioni si succedono in questi motori con grande rapidità, per cui le pareti del cilindro vanno soggette a un forte riscaldamento, che sarebbe esiziale al buon funzionamento della macchina; perciò il cilindro è fatto a doppia parete e nell'intercapedine si fa circolare in modo continuo dell'acqua fredda.

I motori ad esplosione non si mettono in moto da sè come una macchina a vapore; ed è perciò che nei piccoli motori delle automobili, aeroplani e simili, si fa girare direttamente

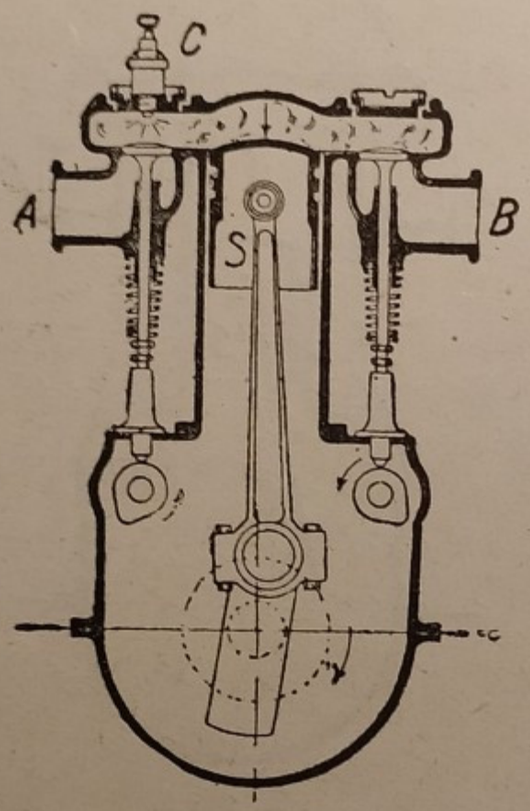


Fig. 217 *c*.

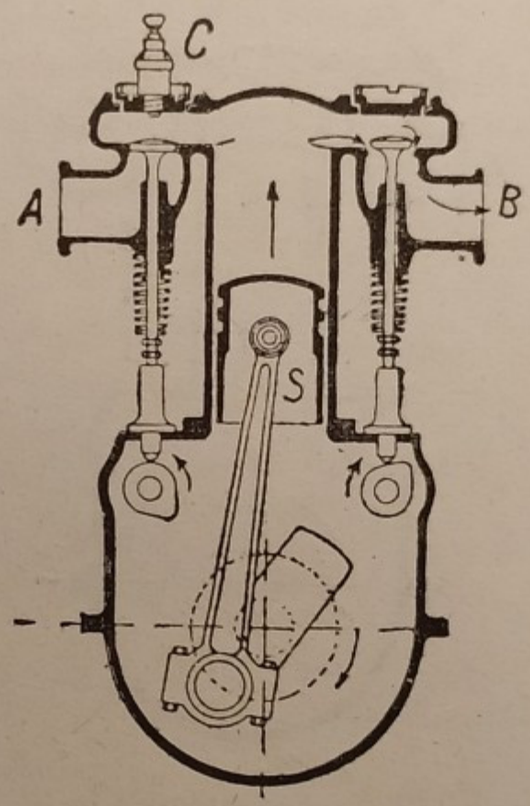


Fig. 217 *d*.

l'albero motore con una manovella o con un motorino elettrico — motore di avviamento — in modo che si compia l'aspirazione e la compressione della miscela esplosiva.

Il rendimento dei motori a scoppio, data la grande differenza tra la temperatura dell'esplosione e quella dell'atmosfera in cui avviene lo scappamento, è superiore a quello delle macchine a vapore, ma un'elevata perdita di calore è prodotta dal raffreddamento del cilindro. Il rendimento può arrivare al 20 %.

Il pregio principale di tali motori sta però nella loro leggerezza; si costruiscono motori di aeroplani in cui il peso è inferiore a kg. 0,5 per HP, e sono i motori che, come già abbiamo fatto osservare, risolsero il problema della navigazione aerea.

123. Macchine refrigeranti. — La scienza del freddo si sviluppò lentamente per opera di un gran numero di Scienziati ed è nata dalle ricerche effettuate per la liquefazione dei gas (§§ 108 e seg.).

Le macchine refrigeranti utilizzano dei fluidi che passano facilmente dallo stato liquido al gassoso e viceversa, cioè i fluidi più instabili. Si prestano allo scopo particolarmente i seguenti: l'*anidride carbonica*, l'*ammoniaca gassosa anidra*, l'*anidride solforosa* e il *cloruro di metile*.

Per intendere il funzionamento di una macchina refrigerante supponiamo di avere un tubo a serpentino contenente, ad esempio, dell'ammoniaca anidra già liquefatta, non importa momentaneamente come. Una pompa aspirante produce nel serpentino una depressione che determina la rapida evaporazione del liquido e una conseguente sottrazione di calore all'aria ambiente. Entra qui evidentemente in gioco il calore di vaporizzazione, di cui è detto al paragrafo 107. Un ambiente limitato in cui fosse collocato un tal serpentino diverrebbe una camera refrigerante.

È evidente però che una tal soluzione semplice porterebbe a un consumo tanto grande di gas che l'industria del freddo non sarebbe economicamente possibile. È quindi necessario mantenere in moto un *compressore* per far ritornare la sostanza allo stato liquido. Il compressore è a *doppio effetto*, per assicurare una circolazione continua del fluido refrigerante, vale a dire serve come macchina pneumatica per facilitarne la evaporazione e come compressore vero e proprio per far ritornare nel serpentino il fluido allo stato liquido. Il serpentino evaporatore pesca interamente in un serbatoio contenente un liquido incongelabile, che è una soluzione concentrata in acqua di cloruro di sodio, di potassio o di calcio. Questo liquido mantenuto costantemente a bassa temperatura per effetto dell'evaporazione del fluido operante, è poi mandato in una serie di tubi che si svolgono nella camera fredda destinata a contenere le sostanze che si vogliono mantenere a bassa temperatura.

La figura schematica 218 riassume l'insieme delle diverse parti. Quando lo stantuffo S del compressore CC discende, si apre la valvola A attraverso la quale viene aspirato il gas

che viene dal serpentino evaporatore S_1, e contemporaneamente si apre la valvola E attraverso la quale viene spinto nel serpentino S_2 del condensatore R_2 il gas che precedentemente era stato aspirato sotto la faccia inferiore dello stantuffo.

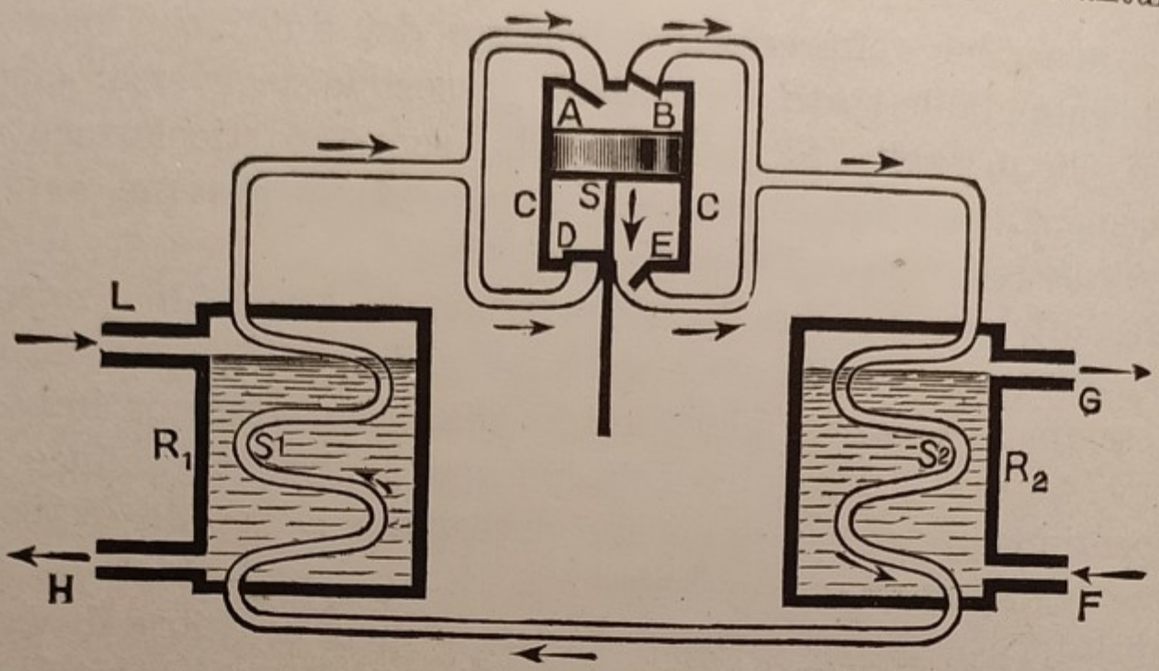


Fig. 218.

Or quando questo s'innalza, le valvole A ed E si chiudono e si aprono le D e B, attraverso la prima delle quali si compie ancora l'aspirazione dal serpentino S_1 e attraverso la seconda il gas precedentemente aspirato viene mandato nel condensatore S_2. Il serbatoio R_1 che accoglie il serpentino evaporatore è pieno della soluzione incongelabile che si mantiene fredda e che mediante un tubo che mette capo in H ed L vien fatta circolare nella camera refrigerante.

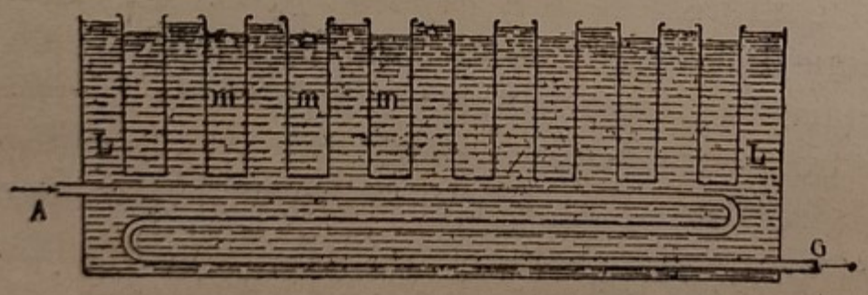


Fig. 219.

Notisi infine che attorno al serpentino S_2 del condensatore, mediante i tubi F e G si fa circolare continuamente dell'acqua fredda per sottrarre al fluido il calore dovuto alla compressione (114).

Nelle fabbriche di ghiaccio artificiale il recipiente R_1 che contiene il serpentino evaporatore, è una vasca LL (fig. 219)

nella quale il serpentino evaporatore è rappresentato dal tubo *AG*. Nella soluzione incongelabile contenuta in detta vasca si immergono le vaschette parallelepipede *mm* contenenti l'acqua pura che si trasforma in ghiaccio.

Non è chi non conosca l'importanza attuale degli impianti frigoriferi destinati, oltre che alla fabbricazione del ghiaccio, alla conservazione di molte sostanze alimentari — carni, uova, ecc. — dato che il freddo ne impedisce l'alterazione causata dal caldo e dai microorganismi. Grandiosi impianti frigoriferi si trovano a bordo dei piroscafi che trasportano da un luogo all'altro della Terra merci deperibili. Le ferrovie dispongono allo stesso scopo di vagoni refrigeranti.

Riscaldamento e ventilazione degli ambienti abitati e industriali.

124. Apparecchi di riscaldamento. — Il riscaldamento artificiale degli ambienti abitati e industriali durante la fredda stagione assicura all'uomo una delle condizioni più favorevoli per lo svolgimento regolare delle sue attività. Tale riscaldamento è ottenuto in varie maniere, in relazione alle diverse condizioni degli ambienti; in tutti i casi il sistema riscaldante deve versare nell'ambiente le calorie necessarie per compensare le perdite di calore attraverso i muri, i soffitti, i pavimenti; perdite che dipendono da varie circostanze: spessore dei muri, loro natura ecc., e dalla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

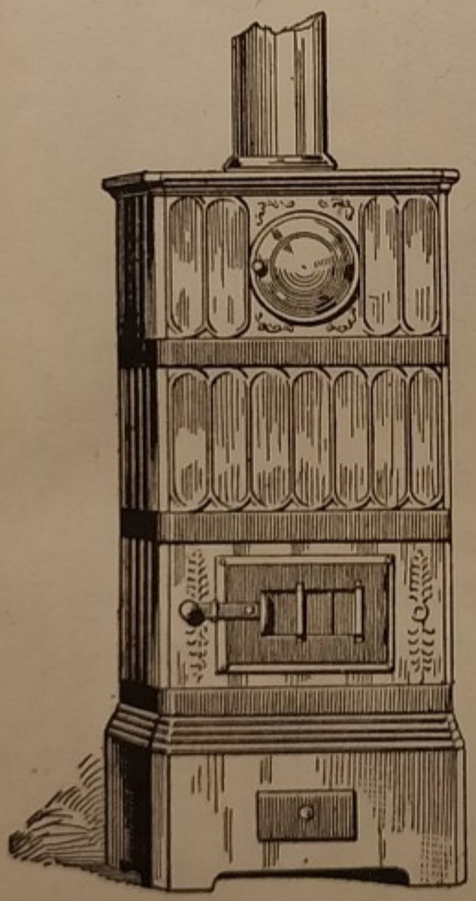


Fig. 220.

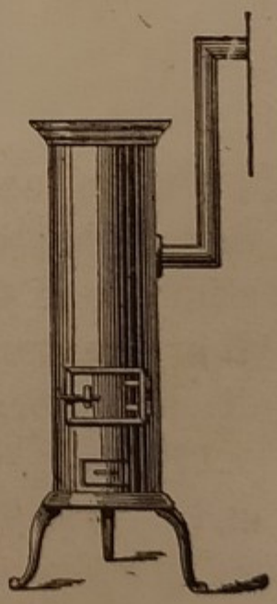


Fig. 221.

I piccoli ambienti vengono ancora, specialmente nei paesi, riscaldati mediante *stufe*, che sono focolari chiusi entro un inviluppo di terra-

cotta o di metallo, muniti di camino per smaltire i prodotti della combustione (fig. 220 e 221). Le stufe hanno un rendimento abbastanza elevato, potendo utilizzare fino ai 9/10 del calore sviluppato dal combustibile. Presentano però diversi inconvenienti: assicurano uno scarso ricambio d'aria dell'ambiente; il pulviscolo atmosferico a contatto delle pareti metalliche, che spesso si riscaldano eccessivamente, brucia e dà cattivo odore; l'aria dell'ambiente riesce troppo asciutta, ciò che rende necessario di porre sopra la stufa una ciotola con acqua, che evaporando dà all'aria l'umidità perduta.

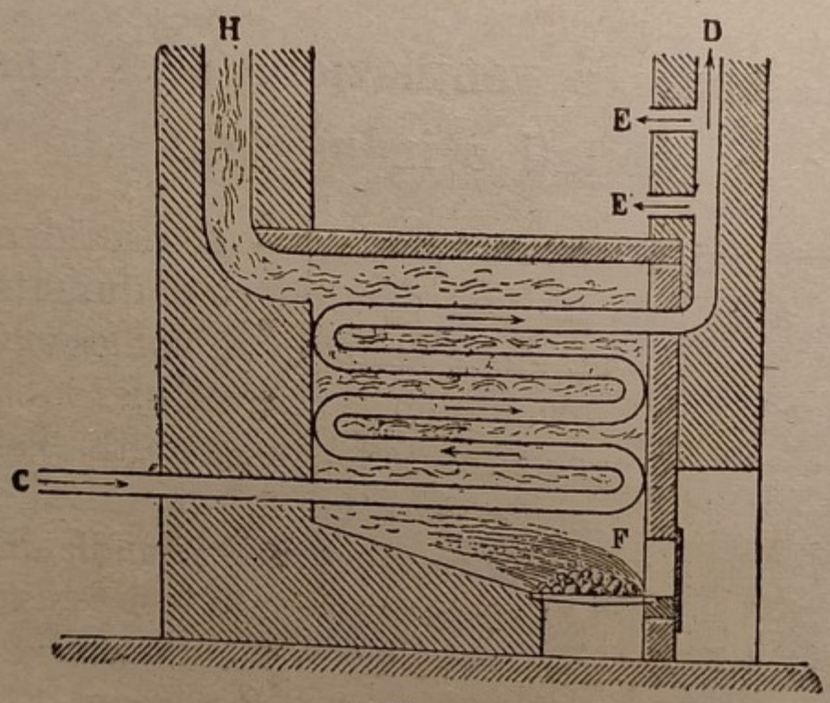


Fig. 222.

Vanno assolutamente proscritte le stufe esclusivamente metalliche; occorre che il focolare sia circondato da un rivestimento di terra refrattaria, per impedire alle pareti metalliche di arroventarsi, per il qual fatto diventano permeabili all'ossido di carbonio, velenosissimo, che si diffonderebbe nella stanza.

I *caloriferi* sono focolari di grandi dimensioni atti a riscaldare un intero appartamento e spesso anche tutto un edifizio. Si hanno tre specie di caloriferi: 1° *ad aria calda*; 2° *a vapore*; 3° *ad acqua*.

Il *calorifero ad aria calda* (fig. 222) è formato di un focolare *F*, collocato nel sotterraneo, che scalda una serie di tubi a zig-zag

i quali aspirano l'aria dall'esterno per *C* e la portano negli ambienti attraverso le *bocche del calore E*.

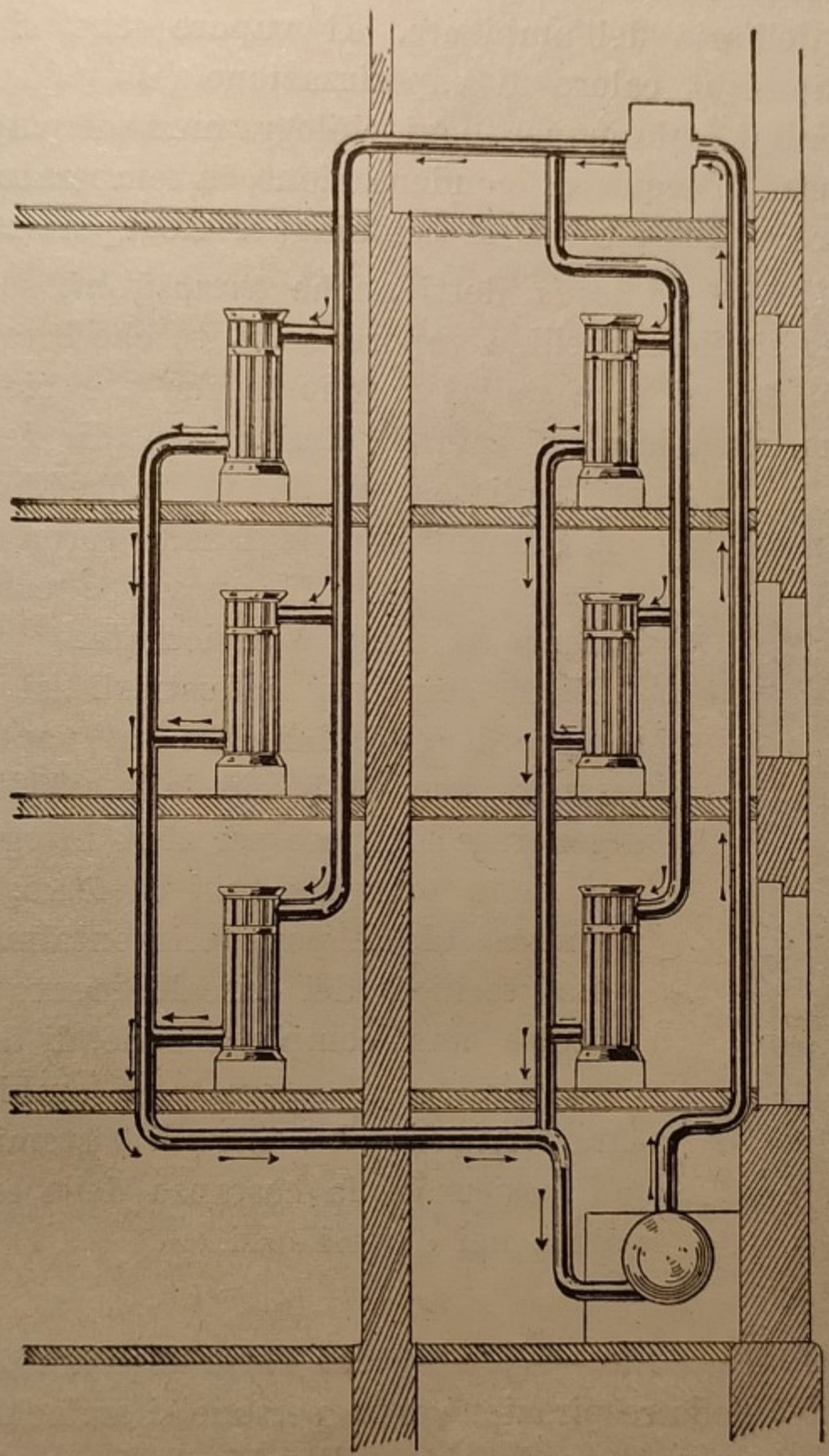


Fig. 223.

Nei *caloriferi a vapore* (fig. 223) una caldaia, posta pure nei sotterranei, produce vapore a poco più di 100°. Questo vapore

vien portato da tubi nei diversi ambienti dove sono installati i *radiatori* (fig. 224) formati di tubi ad alette o a superficie irregolare così da presentare una larga superficie a contatto dell'aria dell'ambiente. Il vapore che si condensa, abbandona il calore di vaporizzazione (107) in ragione di 538 grandi calorie per ogni chilogrammo di vapore che si condensa. L'acqua di condensazione, a temperatura di poco inferiore ai 100°, torna in caldaia per rievaporizzarsi.

I *caloriferi ad acqua*, detti anche *termosifoni*, sono formati in modo simile a quelli a vapore, soltanto che in questo caso, caldaia, tubazioni e radiatori sono totalmente pieni d'acqua. L'acqua riscaldata in caldaia diminuendo di densità, sale nei radiatori, vi circola raffreddandosi, per cui aumentando di densità torna in caldaia, dove si riscalda di nuovo, e così la circolazione continua è assicurata.

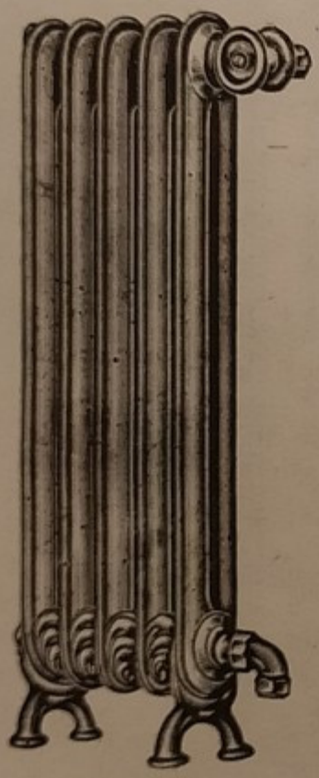


Fig. 224.

Negli impianti industriali si usa quasi sempre il riscaldamento a vapore, questo essendo generato in più dalle caldaie destinate a generare il vapore per altri bisogni. I radiatori sono semplici tubi di ferro, muniti di numerose alette posti orizzontalmente.

La tecnica del riscaldamento ha ormai raccolto una completa serie di dati relativi alle perdite di calore negli ambienti e alle caratteristiche dei diversi sistemi e quindi può assicurare la costanza della temperatura voluta nei diversi casi.

125. Ventilazione. — È noto che l'aria degli ambienti abitati per effetto della respirazione delle persone si arricchisce di anidride carbonica in modo che se l'ambiente fosse chiuso l'aria diventerebbe rapidamente irrespirabile. Anche più della anidride carbonica sono dannose le esalazioni organiche di varia natura emesse dalla pelle, che generano malessere e non di rado deliquio. Le cose poi peggiorano negli stabilimenti indu-

striali, dove spesso si ha la formazione di grande quantità di pulviscolo che entrando nei polmoni produce serie malattie; in altri casi si hanno emanazioni di vapori acidi. È perciò di assoluta importanza sottrarre l'aria guasta e sostituirla con aria pura presa all'esterno.

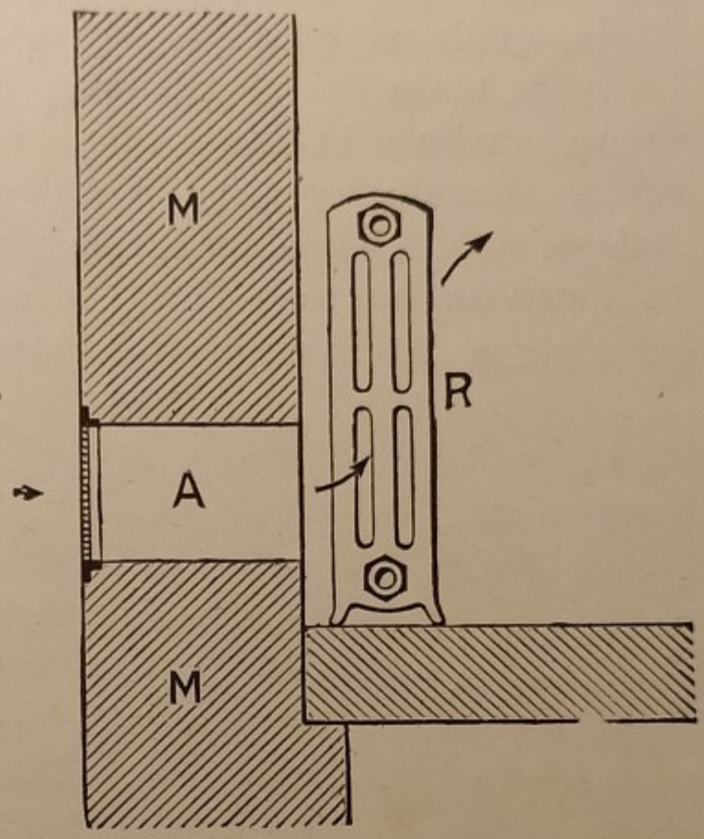


Fig. 225.

Il ricambio è ottenuto con la *ventilazione*, che può essere *naturale* e *artificiale*. La *ventilazione naturale* consiste in un ricambio d'aria spontaneo attraverso eventuali fenditure, attraverso i muri, i pavimenti ecc. In certi casi si attiva aprendo di tanto in tanto le finestre o adattando nella parte superiore di queste un telaio mobile intorno a un asse orizzontale, che lascia un'apertura in alto, così da non produrre correnti moleste o dannose.

La *ventilazione artificiale* può effettuarsi o per differenza di temperatura o con *ventilatori* veri e propri. La ventilazione per differenza di temperatura è largamente messa in opera negli stabilimenti scolastici, ospedali e simili, ricorrendo alla disposizione della figura 225. I radiatori *R* vengono collocati a ridosso di un muro esterno *MM*, che porta un'apertura *A*, munita esternamente di una rete metallica, comunicante con l'esterno. In tal modo la corrente d'aria pura richiamata per *A* lambendo il radiatore si riscalda e arriva nell'interno senza produrre alcun senso di molestia. Per smaltire poi l'aria viziata, negli ambienti sono poste delle bocche con sportelli regolabili, comunicanti con canali verticali, come camini, che finiscono sul tetto in comignoli. Le bocche sono duplici, vale a dire poste in alto e in basso; d'estate si fanno agire quelle in alto, d'inverno

quelle in basso. In tal maniera l'aria della stanza rimane fresca d'estate e calda d'inverno.

I *ventilatori*, quasi sempre centrifughi, azionati da un apposito motore, sono destinati a un più abbondante e rapido ricambio d'aria, quale si conviene spesso negli ambienti industriali. La ruota alata del ventilatore è compresa in un'apertura circolare praticata in alto e talora in basso in un muro dell'ambiente. Quando il ventilatore è in alto agisce per espellere l'aria viziata, se è in basso per il richiamo dell'aria pura dall'esterno. In quest'ultimo caso l'aria in certi casi è preventivamente filtrata, se è d'inverno riscaldata e se d'estate raffreddata.

ACUSTICA

126. Vibrazione dei corpi elastici. — Si prenda una verga elastica, per esempio di acciaio, e la si fissi nel suo estremo inferiore C (fig. 226). Se si piega la sbarra, portando l'estremo libero in D', e la si abbandona, essa tende a ritornare nella posizione di riposo, ma per effetto delle forze elastiche che si destano in seguito alla flessione subita, compie delle oscillazioni, in modo che l'estremo libero D oscilla fra due posizioni estreme D' e D''. Le oscillazioni vanno più o meno rapidamente diminuendo di ampiezza in causa dell'attrito interno, dovendo le molecole strofinare l'una contro l'altra, e della resistenza dell'aria. La verga compie cioè delle vibrazioni *smorzate*, ma tutte *isocrone*, ossia di periodo indipendente dall'ampiezza, almeno finchè questa non sia troppo grande. Si ripete in sostanza il fenomeno delle oscillazioni pendolari con la legge dell'isocronismo.

Fig. 226.

Queste oscillazioni sono in genere molto rapide, specialmente per verghe corte e di discrete dimensioni trasverse, poichè in tal caso le forze motrici sono molto grandi e piccola la massa in movimento. Oscillazioni di tal genere, che si dicono più spesso *vibrazioni*, possono generare un suono.

Anzi è provato che qualunque suono ha origine da vibrazioni di corpi. Una verga di acciaio come quella descritta, lunga una quindicina di centimetri, di sezione rettangolare con dimensioni di 5 a 10 mm., messa in vibrazione, produce un suono nettamente musicale.

Una corda da violino, eccitata da un archetto, entra in vibrazione assumendo l'aspetto di un fuso e dà un suono (fig. 227).

Fig. 227.

Una serie di rapidi colpi, battuti, a mo' d'esempio, con un dito sopra un tavolo, sono dall'orecchio percepiti distinti l'un dall'altro; ma se si producono con maggior rapidità, per un fenomeno auditivo analogo alla persistenza delle immagini visive sulla retina, non vengono percepiti staccati, ma si ha una sensazione continua, cioè un suono di carattere musicale. Ciò è provato dalla seguente esperienza. Sopra un motorino elet-

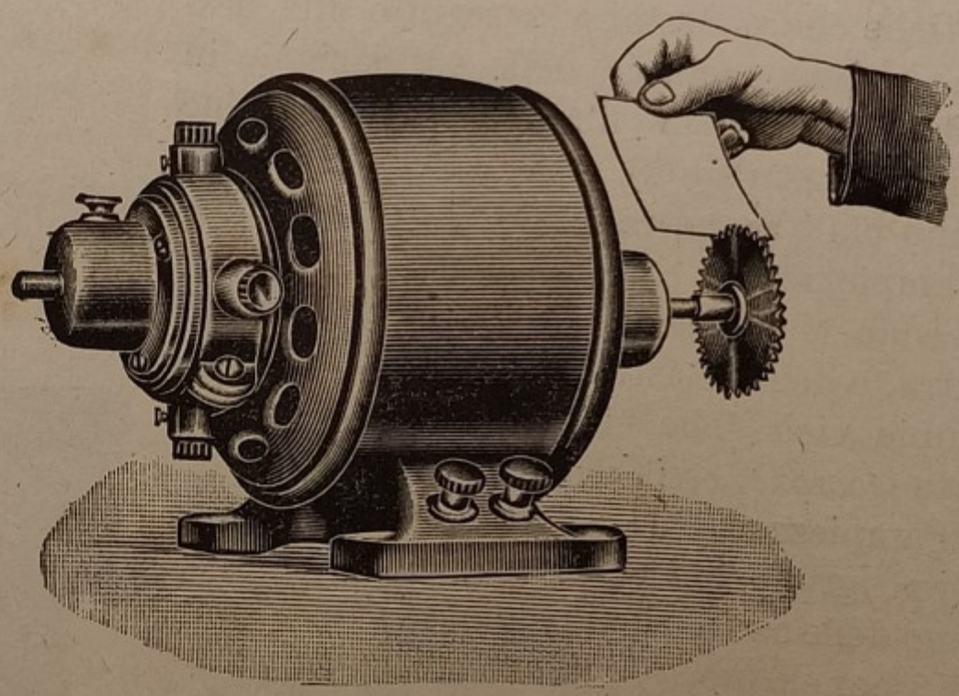


Fig. 228.

trico — in mancanza di questo si può usare un motore a mano qualunque — è montata una ruota dentata, che vien messa in moto piuttosto rapido e contro i denti si appoggia il bordo di una carta da visita (fig. 228). Così il cartoncino sollevato da

un dente, non appena è libero va a battere contro il dente successivo producendo un piccolo rumore. Se la ruota gira piuttosto lentamente, l'orecchio percepisce staccati i successivi colpi, ma se la velocità cresce si ha una sensazione continua, ossia un vero suono di carattere musicale.

Non soltanto i corpi solidi ma anche i liquidi e i gas, vibranti, dànno un suono. Così se in un tubo sonoro *T*, che abbia una parete di vetro (fig. 229), introduciamo, sospendendolo a un filo, un dischetto di carta velina, teso entro un cerchietto e cosparso di sabbia, vediamo i granelli saltellare vivamente quando il tubo dà un suono, mostrando che l'aria vibra nel tubo.

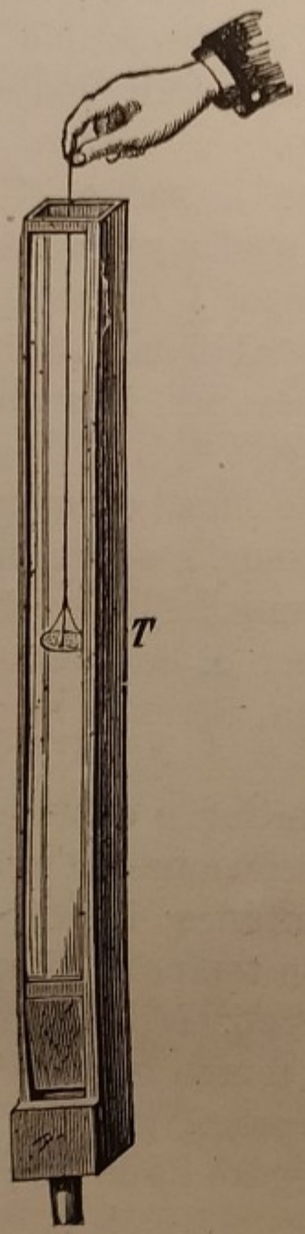


Fig. 229.

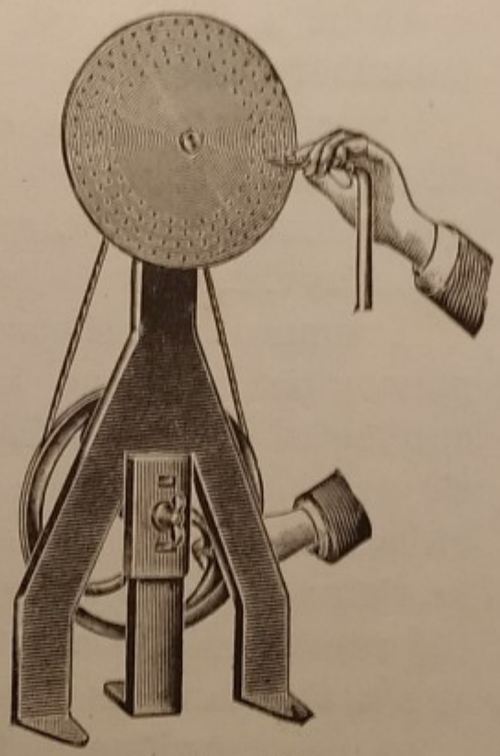


Fig. 230.

Anche un getto d'aria periodicamente interrotto è capace di produrre un suono; per provarlo basta far girare un disco di cartone o di latta, portante verso la periferia una o più corone di fori equidistanti e dirigere un getto d'aria contro una delle dette corone mediante un tubo affilato (fig. 230). Nell'istante in cui l'orifizio del tubo corrisponde a un foro l'aria lo attraversa e spinge via l'aria che sta dall'altra parte; subito dopo, il getto d'aria viene intercettato dal tratto pieno del disco che sta fra due fori successivi; l'aria posteriore, per effetto della sua elasticità, torna indietro e questo doppio movimento, ripetendosi ad intervalli molto vicini, produce ancora un suono. L'apparecchio è detto *sirena*.

127. Propagazione dei moti vibratori - Velocità di trasmissione. — Le vibrazioni di un corpo sonoro non possono però impressionare l'orecchio se non gli vengono *trasmesse per opera di un mezzo elastico*, in mancanza del quale l'orecchio non sente.

L'*aria* trasmette le vibrazioni vibrando essa stessa.

I *corpi solidi duri* trasmettono bene il suono; un orecchio appoggiato contro l'estremità di un tavolo sente benissimo il rumore prodotto da un'unghia che si fa strisciare contro l'altra estremità, o dal tic-tac di un orologio.

Anche i *liquidi* son capaci di trasmettere il suono. Un palombaro ode i rumori prodotti nell'acqua o alla superficie.

I corpi solidi *non elastici*, quali il piumino, i tappeti, i materassi, non vibrano e *spengono il suono*. Abbiamo anche qui insomma dei corpi *trasparenti* ed *opachi* per il suono come avviene per la luce.

Il suono non si *propaga nel vuoto*. Sotto una campana pneumatica si pone un campanello, poggiandolo sopra un cuscinetto di ovatta. Mettendo in azione il campanello, finchè c'è aria nella campana si ode il suono, ma non si ode affatto nulla quando venga fatto il vuoto. Il suono riprende se si fa rientrare l'aria nella campana.

I rumori in alta montagna, quali un colpo di fucile e la voce stessa, risultano assai deboli per causa della rarefazione dell'aria.

La propagazione in tutti i casi non è istantanea; infatti si nota che durante un temporale passa un certo tempo fra l'apparizione del lampo e la percezione del tuono. L'intervallo di tempo che separa i due fenomeni misura il tempo impiegato dal suono a percorrere la distanza fra i due punti, giacchè si può ritenere come affatto nullo il tempo impiegato dalla luce a percorrere la distanza stessa.

Le prime misure precise della velocità del suono nell'aria furono eseguite nel 1738 da una Commissione dell'Accademia delle Scienze francese fra Montlhéry e Montmartre; si trovò una velocità di 337 metri al secondo.

Queste esperienze vennero riprese nel 1822 dall'Ufficio delle Longitudini fra Montlhéry e Villejuif, e dettero 340 metri al secondo alla temperatura di 15°.

Altre esperienze fatte in seguito, utilizzando tutte le ri-

sorse della Fisica, hanno dato dei risultati leggermente diversi, sicchè si può ritenere che *la velocità nell'aria a 0° sia di 333 metri al secondo.*

Nel 1827 Colladon e Sturm hanno misurato la velocità del suono nell'acqua del lago di Ginevra, fra due battelli ancorati alla distanza di circa 13 chilometri (fig. 231). Alla stazione *A* era sospesa una campana immersa nell'acqua, e ad un certo momento, colla pressione contro una leva *L* veniva battuto

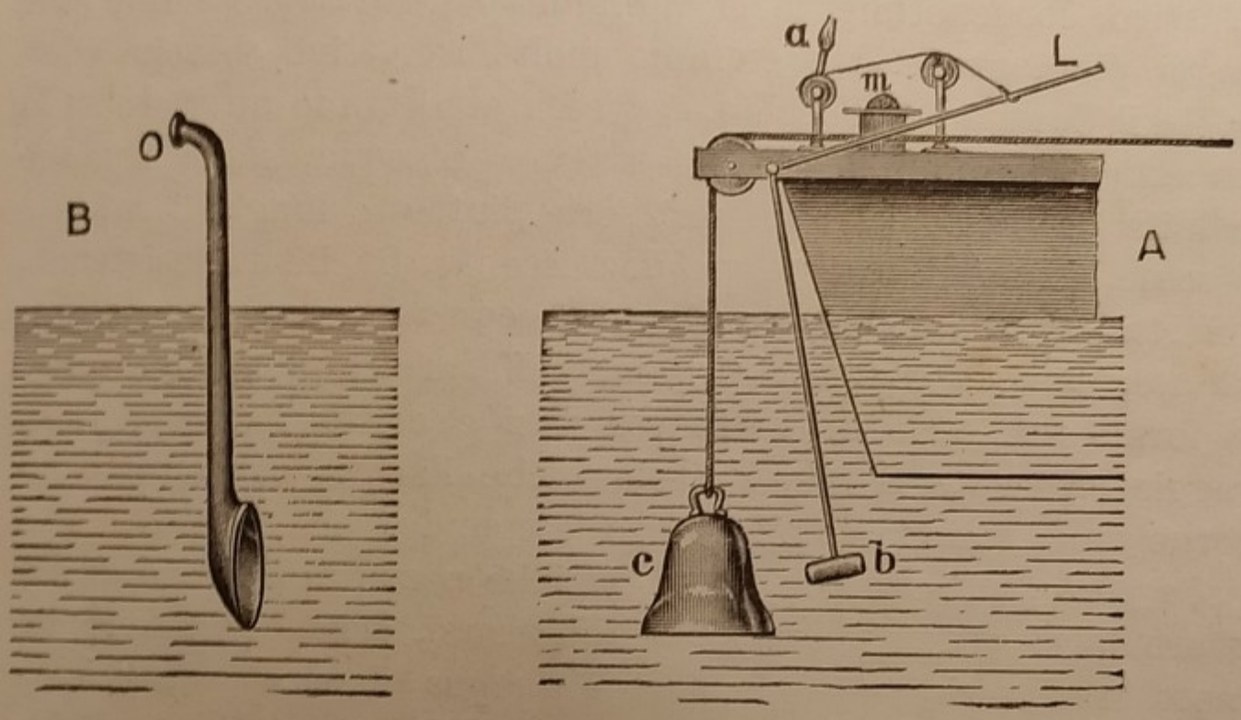


Fig. 231.

un colpo contro la campana, mentre una miccia *a* accesa si abbassava ed accendeva una massa di polvere *m*, nel momento preciso in cui il colpo veniva prodotto. All'altra stazione *B* era immerso nell'acqua una specie di cornetto acustico (134), la cui apertura maggiore, disposta in piano verticale e rivolta verso la campana, era chiusa da una membrana tesa; l'estremità superiore *o* del cornetto veniva introdotta nell'orecchio dell'osservatore. Il tempo che decorreva fra l'apparizione del lampo e la percezione del suono rappresentava in tal modo il tempo impiegato dal suono a percorrere la distanza fra le due stazioni. Si trovò la velocità di 1435 metri al secondo, essendo l'acqua a 8°.

In seguito, con metodi diretti e indiretti, venne misurata la velocità in altri mezzi: nei metalli è notevolmente mag-

giore di quella nell'aria; nel piombo è 4 volte e nell'acciaio 15 volte maggiore; nel legno di abete fu riscontrata oltre 17 volte maggiore.

Notiamo infine che la velocità in un dato mezzo è stata riscontrata la stessa per tutti i suoni.

128. Meccanismo di propagazione. - Onde sonore. — Quando si produce uno scuotimento in una regione qualsiasi di un mezzo elastico, lo scuotimento si comunica *successivamente* fino alle parti più lontane. Un esempio molto istruttivo, perchè cade sotto il dominio dell'occhio, si presenta gettando un sasso sulla superficie tranquilla di uno stagno. L'acqua, nella regione colpita dal sasso, compie una serie piuttosto lunga di salite e discese, di ampiezza via via decrescente, finchè la resistenza, offerta dai legami che essa ha coll'acqua circostante e sottostante, non la riduce in quiete. Nel frattempo all'intorno si forma una serie di anelli convessi e concavi alternati, di raggio crescente, dando l'illusione che l'acqua corra tutto intorno dalla regione colpita verso le sponde.

Se però sull'acqua si trova qualche pezzo di legno o di sughero lo si vedrà sollevarsi e abbassarsi, senza assumere un moto traslatorio sensibile. *Non è dunque il mezzo elastico* — l'acqua nel caso nostro — *che progredisce; progredisce soltanto il moto da particella a particella del mezzo; ogni particella non fa che oscillare entro due limiti fissi, comunicando il proprio moto alle particelle attigue e obbligandole a compiere lo stesso movimento.*

Quando, come nel caso sopra citato, le vibrazioni delle molecole del mezzo avvengono in una direzione *perpendicolare* a quella della propagazione del movimento, le vibrazioni si dicono *trasversali*. Tali vibrazioni si ottengono ancora agitando con una mano l'estremità libera inferiore di una corda elastica, un tubo di caoutchouc, ad esempio, lunga parecchi metri, fissata all'estremità superiore; e avvengono anche nello stesso modo in tutte le corde degli strumenti sonori.

Vibrazioni longitudinali sono invece quelle che avvengono *nella stessa direzione* della propagazione del movimento. Così avvengono tutte le vibrazioni che si propagano in seno a un

liquido o a un gas, come verrà più sotto chiarito. Per intendere il meccanismo delle vibrazioni longitudinali si sospendano a guisa di pendoli, mediante fili della stessa lunghezza, delle sfere d'avorio tutte eguali, scegliendo i punti di sospensione in modo che le sfere risultino a contatto l'una coll'altra (fig. 232).

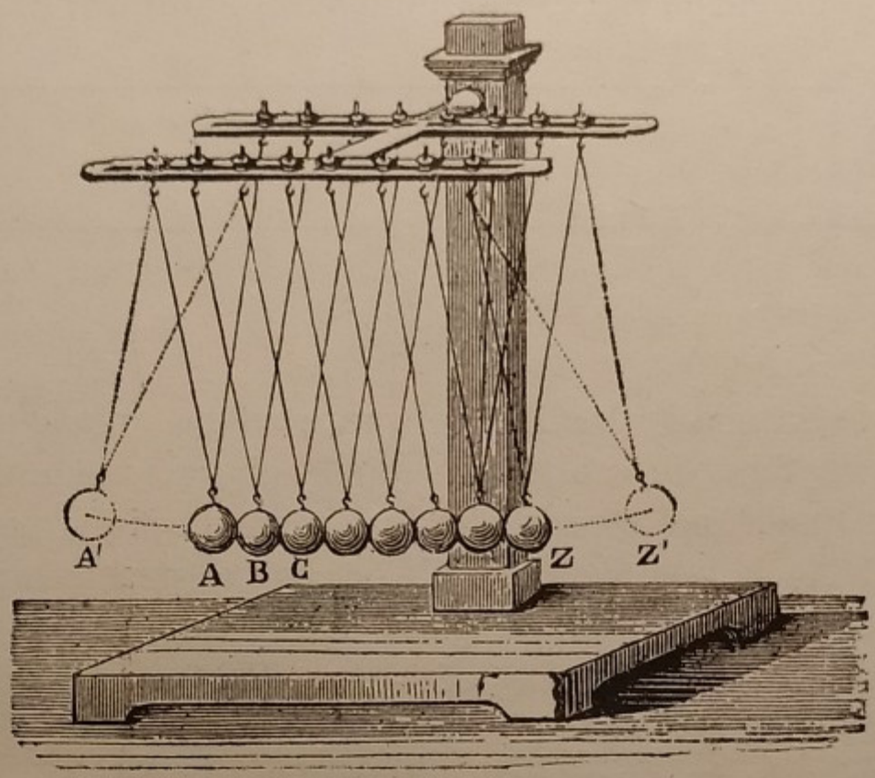


Fig. 232.

Sollevata la prima sfera *A* della serie, la si lascia cadere e si osserva che essa, battendo contro la 2ª, si ferma istantaneamente e la sfera *Z*, ultima della serie, si solleva, mentre tutte le sfere intermedie rimangono quasi ferme.

La 1ª sfera, per effetto dell'urto contro la 2ª, cede a questa tutta la sua velocità, la 2ª si comporta nello stesso modo rispetto alla 3ª e così via; è quindi logico che si muova soltanto l'ultima, che è libera. Attraverso la serie di sfere si ha quindi la propagazione di onde longitudinali, poichè ogni sfera compie un movimento che è nella direzione della propagazione.

Per accostarci sempre più al fenomeno reale della propagazione del suono in un mezzo omogeneo, consideriamo ora la propagazione dentro un tubo cilindrico, pieno d'aria, indefinitamente lungo (fig. 233). In questo ci sia una lamina *A*

che ne chiude la luce a guisa di stantuffo, lamina che immagineremo in moto oscillatorio continuato, compreso tra due posizioni fisse A_1 A_2 equidistanti dalla posizione intermedia di equilibrio A. Mentre la lamina passa da A_2 ad A_1 l'aria che sta a destra non si avanza tutta in blocco, come avverrebbe se l'aria fosse un corpo rigido mobile lungo il cilindro, ma lo strato

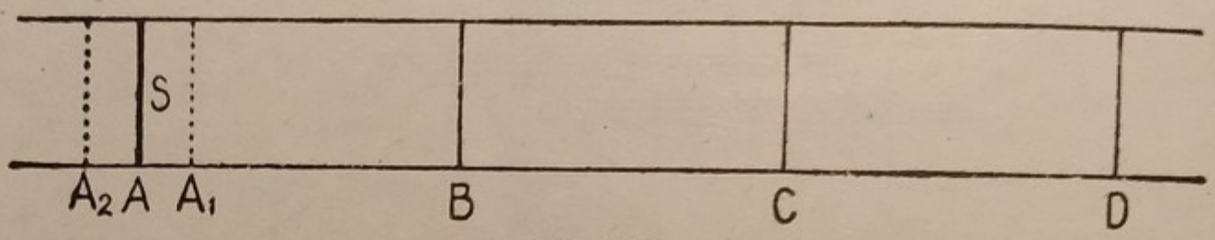


Fig. 233.

d'aria, aderente alla lamina vibrante viene spinto contro lo strato successivo, questo spinge quello che gli viene di seguito e così via finchè nel tempo che la lamina impiega per passare da A_2 ad A_1 la *compressione* da strato a strato sarà giunta fino a uno strato B, oltre il quale regna la pressione normale; in tale istante l'aria compresa fra A_1 e B è *compressa*, o, come si dice, tra A_1 e B si ha un'*onda condensata*.

Retrocedendo in seguito la lamina da A_1 ad A_2, essa produrrà alla sua destra una *rarefazione*, che giungerà ancora in B nell'istante che la lamina è giunta in A_2 se il suo ritorno da A_1 in A_2 durerà lo stesso tempo che ha durato l'andata da A_2 ad A_1. Tra A_1 e B si ha allora un'*onda rarefatta*, mentre la compressione precedente che nel frattempo si è avanzata, si trova compresa fra B e C, essendo $BC = A_1B$. Da questo istante la lamina riprende la sua avanzata da A_2 ad A_1, con che si forma un'*onda condensata* fra A_1 e B, mentre la rarefazione precedente si troverà fra B e C e la prima compressione fra C e D, essendo ancora $CD = BC$. Ciò che in seguito avviene, per effetto del moto continuato alternativo della lamina oscillante, non ha bisogno di essere spiegato; la conclusione è che, mentre la lamina continua a vibrare, la massa d'aria del tubo, sia a destra sia a sinistra, ammesso che il tubo si prolunghi anche da questa parte, risulta divisa in colonne alternativamente condensate e rarefatte, o, come si dice, in *onde condensate* e *rarefatte*.

Con un'analisi più accurata del fenomeno, si verrebbe inoltre a dimostrare che lo straterello d'aria che divide l'onda condensata da quella rarefatta ha la densità normale e che lo straterello che dimezza l'una o l'altra onda possiede la massima compressione o la massima rarefazione, sicchè procedendo da strato a strato si ha una lenta e graduale variazione nella densità dell'aria.

Se perciò si vuole rappresentare lo stato di diversa compressione o rarefazione che possiedono ad un dato istante i diversi strati d'aria che stanno nel tubo, sopra una retta MN parallela all'asse del tubo si segnano i segmenti $BC = CD = DE = ...$ (fig. 234), che hanno la lunghezza delle onde considerate, e in ogni punto dei singoli segmenti si tracciano dei segmenti perpendicolari alla MN, aventi lunghezza proporzionale alla com-

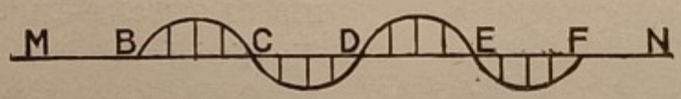


Fig. 234.

pressione che regna nello strato corrispondente. Tali segmenti saranno diretti verso l'alto in corrispondenza alle compressioni e verso il basso nell'altro caso.

Riunendo allora con una linea le estremità di quei segmenti, si otterrà la linea sinuosa della figura, la quale rappresenta evidentemente lo stato dell'aria nel tubo in un determinato istante e precisamente nell'istante in cui la lamina vibrante, considerata nella figura 233 si trova in A_1. Però, lasciando scorrere il tempo, progrediscono nel tubo sia la compressione come la rarefazione, di modo che, passato, a partire dall'istante or ora considerato, un tempo eguale a quello impiegato dalla lamina per passare da A_1 ad A_2, la linea sinuosa presenta le sue sinuosità rovesciate, essendochè in quest'ultimo istante le compressioni occupano il posto delle rarefazioni precedenti e reciprocamente.

In ogni punto l'aria del tubo risulta alternativamente compressa e rarefatta; uno qualunque degli strati d'aria compie delle vibrazioni come quelle della lamina, soltanto che i diversi strati non passano nello stesso istante per la posizione di riposo.

Un orecchio che si trovasse nel tubo, ad una certa distanza dalla lamina vibrante, riceverebbe perciò dallo strato d'aria che gli è aderente delle pulsazioni periodiche e la sensazione di un suono se tali pulsazioni sono abbastanza rapide.

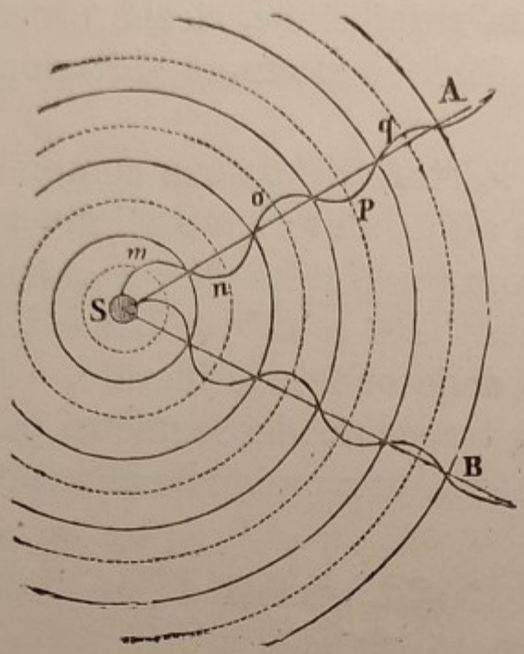


Fig. 235.

Se la sorgente sonora *S* (fig. 235), come avviene d'ordinario, è circondata tutto intorno da un mezzo omogeneo, gli impulsi della sorgente determinano compressioni e rarefazioni del mezzo in tutte le direzioni e in tal modo le onde, invece di avere la forma di colonne cilindriche, hanno la forma di gusci sferici e le superficie di divisione fra le onde condensate e rarefatte — *superficie d'onda* — invece di essere dei piani sono delle superficie sferiche; ma per il rimanente le cose passano esattamente come nella propagazione nel tubo cilindrico; e lo stato di condensazione e di rarefazione del mezzo è anche in questo caso rappresentato da una linea sinuosa tracciata sopra un qualunque raggio *SA* o *SB* avente l'origine in *S*.

129. Suoni puri. — Sono anche detti suoni *semplici* perchè risultano da vibrazioni regolari, del tipo delle oscillazioni del pendolo, ognuna della stessa durata. In essi vanno distinti la *frequenza*, la *lunghezza d'onda* e l'*intensità*.

130. Frequenza e sua misura. — Si dice frequenza il numero delle vibrazioni complete eseguite dalla sorgente sonora in un secondo, e costituisce quel carattere che nella musica è detto *altezza*. Due suoni giudicati dall'orecchio della stessa altezza, anche se provengono da sorgenti di natura diversa, sono prodotti da vibrazioni della stessa frequenza. Per un suono *acuto* la frequenza è *maggiore* che per un suono *grave*.

Per provare che l'altezza del suono dipende dalla frequenza delle vibrazioni, ricorreremo alle 4 ruote della figura 236 unite

solidalmente e che si possono far girare unendole al motorino della figura 228. Le 4 ruote hanno numero diverso di denti, e si constata che passando il cartoncino dalla ruota che ha meno denti alle altre, si hanno quattro suoni via via più acuti.

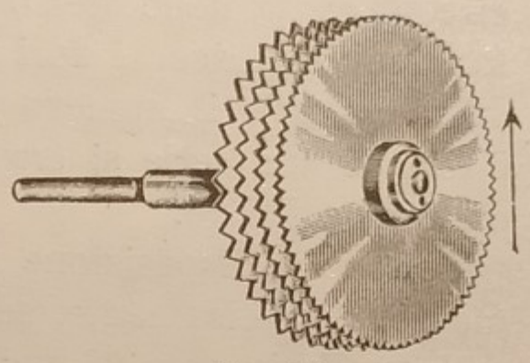


Fig. 236.

Per la misura della frequenza delle vibrazioni di un corpo sonoro si usano due metodi:

1° Il *metodo acustico*, che è fondato sul fatto, sempre verificato dall'esperienza, che due suoni giudicati all'*unisono* dall'orecchio, corrispondono alla *stessa* frequenza; basta allora saper misurare la frequenza di uno dei due suoni.

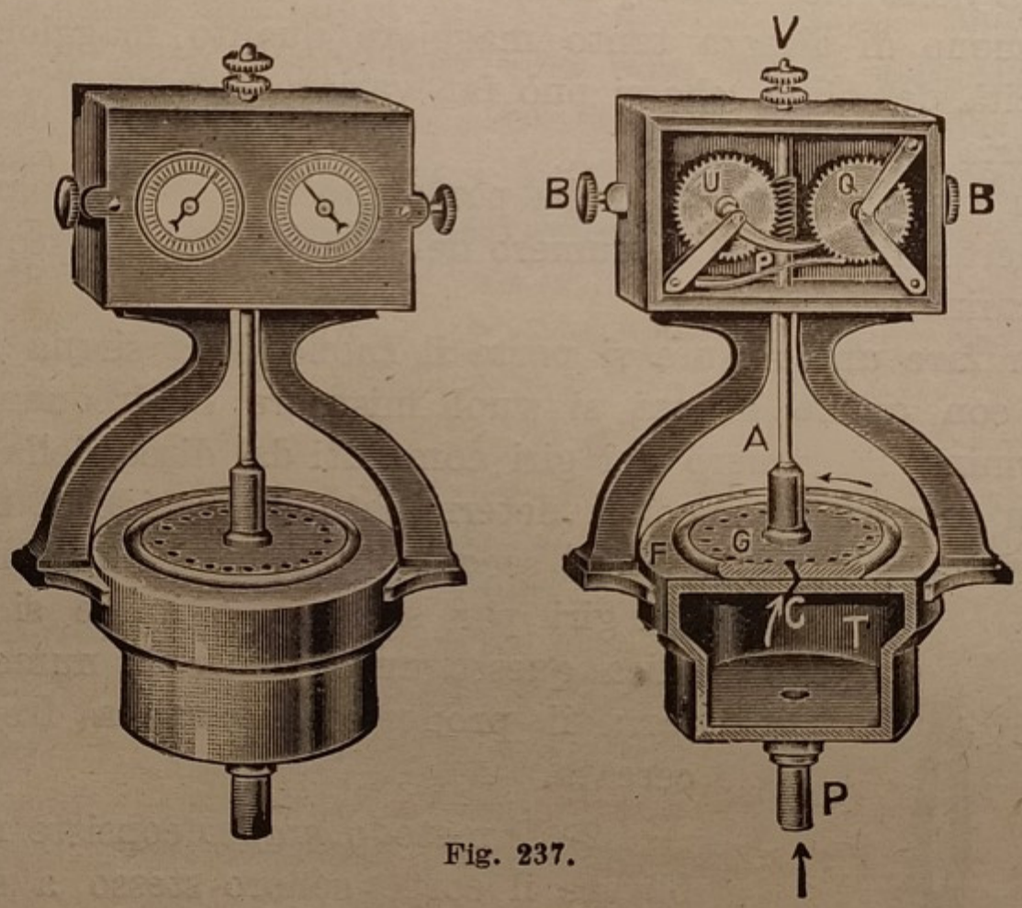


Fig. 237.

A tale scopo serve la *sirena di Cagniard de la Tour* (fig. 237). Essa consiste in un tamburo cilindrico metallico *T*, prolungantesi inferiormente in un tubo tronco-conico *P* per poterlo innestare ad un mantice che serve a iniettare l'aria nel tamburo. Un disco *G* porta verso la periferia una corona di fori, ed è mobile intorno al suo asse, a una piccola distanza dal coperchio del tamburo *T*. Questo porta anche una corona di

fori in egual numero del disco mobile e praticati sopra una circonferenza dello stesso raggio, dimodochè, durante una rotazione del disco, i fori delle due corone coincidono tante volte quant'è il numero dei fori stessi ed altrettante volte i fori di una serie si trovano di fronte al tratto pieno fra un foro e l'altro.

Con tale disposizione l'aria del mantice esce interrottamente, e precisamente, se i fori son 20, ad ogni giro del disco mobile, l'aria esce 20 volte e 20 volte viene intercettata. La rotazione del disco ha luogo automaticamente, per effetto di una inclinazione opportuna dei canali praticati nello spessore del disco e del coperchio, e le periodiche interruzioni dei getti d'aria costituiscono delle vibrazioni come nell'esperienza della sirena del § 126, e per conseguenza si ottiene un suono di altezza tanto maggiore quanto maggiore è la velocità del disco, che si può far variare regolando l'afflusso dell'aria del mantice.

Un contagiri che sta nella parte superiore dell'apparecchio permette di contare il numero dei giri che fa il disco in un determinato tempo.

Per fare una misura si porta il suono della sirena all'unisono con quello di cui si vuol misurare la frequenza e si determina il numero dei giri compiuti dal disco della sirena in un numero di secondi determinato. Si divide il numero dei giri per il numero dei secondi, con che si ha il numero dei giri per secondo, e infine si moltiplica questo numero per il numero dei fori; il prodotto misura la frequenza cercata.

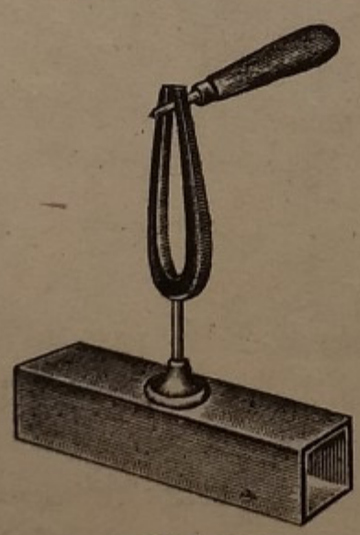


Fig. 238.

2° Il metodo *grafico* consiste nell'obbligare il corpo sonoro stesso a segnare la curva delle sue vibrazioni.

Per comprendere meglio il procedimento usato prendiamo un *corista* o *diapason* (fig. 238). Esso è formato di una forcella di acciaio a branche, dette anche *rebbi*, parallele o convergenti, riunite nella curva con una colonnina che ne costituisce il supporto. Ecci-

tando il corista percotendone una delle branche o, se queste sono convergenti, facendovi passare in mezzo un cilindretto di ferro di diametro un po' più grande della loro distanza, si ottiene un suono nettamente musicale e le estremità libere delle branche assumono un moto oscillatorio rapido che ce le fa apparire confuse.

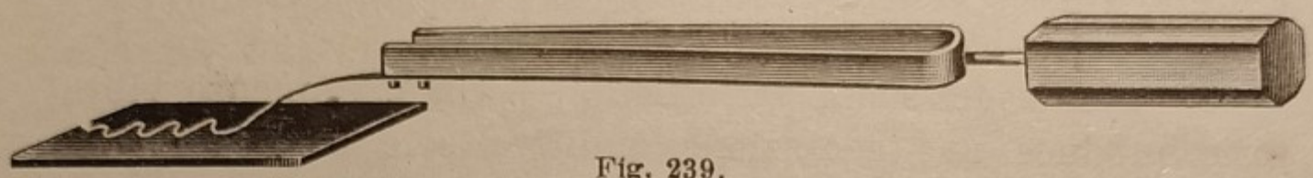


Fig. 239.

Fissiamo ora a una delle branche una punta metallica, detta *stilo*, e messo in vibrazione il corista, moviamolo rapidamente sopra una lastra di vetro affumicata, in modo che durante il moto l'estremità dello stilo strisci sulla lastra, mentre il piano delle branche risulta parallelo a quello della lastra. Si ottiene una linea sinuosa continua e regolare, ciascun dente della quale corrisponde a una vibrazione (figura 239).

La disposizione seguìta per misurare la frequenza delle

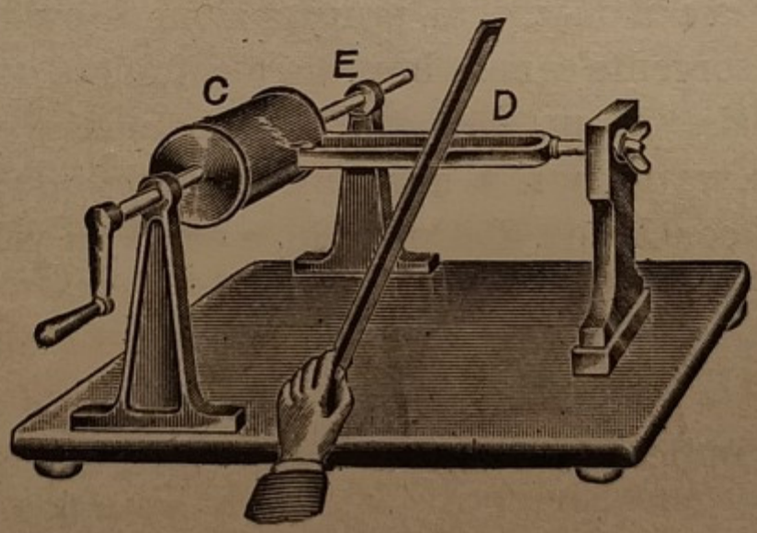


Fig. 240.

vibrazioni del corista è resa chiara dalla figura 240. *C* è un cilindro affumicato che mentre si fa girare mediante una manovella si sposta parallelamente all'asse, essendo l'albero

di rotazione fatto da una parte a vite impegnata nel cuscinetto E fatto a madrevite. Con tale disposizione se si fa appoggiare lo stilo di un corista vibrante D sul cilindro, verrà segnata una linea sinuosa, e siccome ogni sinuosità corrisponde a una vibrazione completa basta conoscere la velocità di rotazione del cilindro per avere il numero delle vibrazioni per secondo.

131. Limite dei suoni percettibili. — Un movimento vibratorio produce una sensazione auditiva solo se è compreso entro certi limiti di frequenza, che varia generalmente da 8 a 24.000 vibrazioni complete al secondo. Al disotto di 8 le vibrazioni vengono percepite come colpi distinti, al disopra di 24.000 l'orecchio è sordo.

132. Lunghezza d'onda. — Alla fine del § 128 abbiamo messo in rilievo le onde sferiche formantisi, attorno a un corpo vibrante, in un mezzo omogeneo indefinito e abbiamo detto che l'*onda sonora* è l'insieme di due strati contigui, l'uno condensato e l'altro rarefatto, e *lunghezza d'onda* lo spessore dei due strati.

Qualunque sia il mezzo di propagazione è evidente che nel tempo che la sorgente sonora impiega a compiere una vibrazione completa, ossia, in un *periodo*, il movimento vibratorio si avanza di un tratto pari a una lunghezza d'onda; sicchè indicando questa con λ, con T il periodo, e con V la velocità di propagazione, si ha:

$$\lambda = VT$$

o altrimenti, indicando con N la frequenza, essendo evidentemente:

$$T = \frac{1}{N}$$

si può anche scrivere:

$$\lambda = \frac{V}{N}.$$

La lunghezza d'onda quindi non caratterizza un suono, poichè essa varia anche con la velocità di propagazione.

Per l'aria $V = 333^m$ a 0°, sicchè per un suono di 100 vibrazioni complete si ha $\lambda = 3^m,33$.

Per l'acqua $V = 1435^m$, per $N = 100$, si ha $\lambda = 14^m,35$.

Chiameremo poi *raggio sonoro* la linea secondo la quale, da molecola a molecola del mezzo, si propaga il moto vibratorio. Se la propagazione avviene in un mezzo omogeneo, che circonda da ogni parte la sorgente sonora, sono raggi sonori tutte le semirette uscenti dalla sorgente.

È poi manifesto che, in base alla definizione di superficie d'onda, data nel paragrafo 128, *i raggi sonori risultano sempre normali alle superficie d'onda che attraversano.*

133. Intensità. — L'intensità è il carattere per cui un suono apparisce più o meno forte; e si dimostra teoricamente che l'intensità del suono all'origine, che diremo intensità *oggettiva*, è *proporzionale alla forza viva del corpo vibrante.*

Ricordando l'espressione della forza viva $\frac{1}{2} mv^2$, è chiaro che l'intensità è proporzionale alla massa vibrante, e al quadrato dell'*ampiezza* della vibrazione, poichè velocità e ampiezza risultano nel moto oscillatorio fra loro proporzionali. L'intensità *soggettiva* del suono, cioè quella con cui il suono viene percepito dall'orecchio, dipende egualmente dalla forza viva comunicata all'orecchio, e quindi si capisce che deve diminuire col diminuire della densità del mezzo, perchè la massa del mezzo che percuote l'orecchio durante una vibrazione diminuisce colla densità e si annulla nel vuoto; ciò è in armonia con quanto abbiamo già esposto (127).

L'intensità *soggettiva*, quando la propagazione avviene in un mezzo omogeneo e indefinito, diminuisce col crescere della distanza, e precisamente è *inversamente proporzionale al quadrato della distanza stessa.* Infatti a una distanza r dalla sorgente, le molecole del mezzo in movimento sono distribuite sopra la sfera di raggio r che ha per superficie $4\pi r^2$, avente nel centro il corpo sonoro. La forza viva A, trasmessa

dalla sorgente, essendo uniformemente distribuita su tale superficie, l'unità di questa ne possiede una frazione $\frac{A}{4\pi r^2}$, cioè una quantità inversamente proporzionale al quadrato di r.

134. Tubi, cornetti acustici, portavoce. — Se la propagazione ha luogo dentro un tubo cilindrico, la forza viva si comunica da uno strato ad uno successivo avente la stessa superficie, che è la sezione retta del cilindro, perciò essa si mantiene presso a poco costante a tutte le distanze. Da ciò l'uso

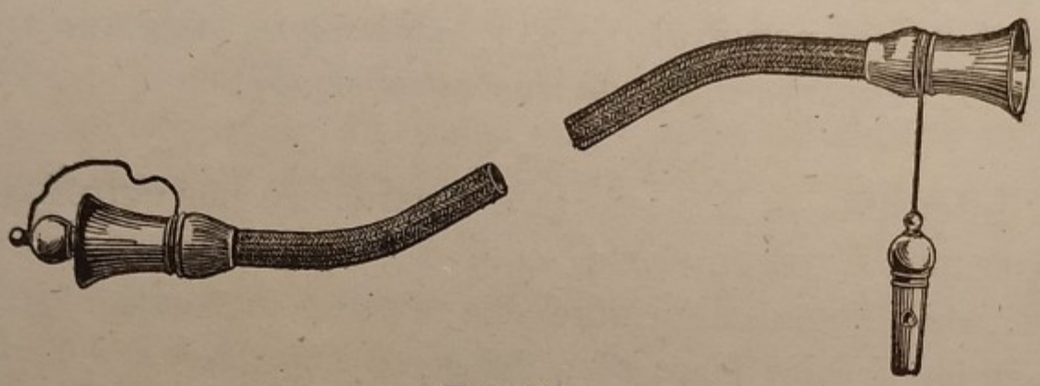


Fig. 241.

dei *tubi acustici*, che son tubi che, seguendo un percorso qualunque, mettono capo ai due locali fra cui si vuole stabilire una comunicazione orale. Parlando contro una imboccatura che sta all'estremità del tubo, la voce viene chiaramente percepita da un'altra persona che accosti l'orecchio all'altro estremo (fig. 241).

Quando non si parla, in ciascuna delle due imboccature estreme del tubo è impegnato un tappo a fischio, dimodochè la persona che fa la chiamata estrae il tappo che sta dalla sua parte e soffiando con forza dentro l'imboccatura fa agire il fischietto dell'altra estremità. Giova però osservare che l'uso ormai universale del telefono ha servito ad abolire quasi totalmente quello dei tubi acustici.

Fig. 242.

Nel *cornetto acustico* usato dalle persone di orecchio ottuso, le onde sonore si riflettono sulle pareti e portano all'orecchio la forza viva che proviene da una superficie d'onda alquanto estesa (fig. 242).

Il *portavoce* o *megafono*, largamente usato nella marina e assai nell'ultima guerra, per trasmettere ordini e fare comunicazioni a distanza, è un lungo tubo di lamiera, conico, con l'estremità stretta fatta a imboccatura, e l'altra aprentesi ad imbuto (fig. 243). Agisce come il cornetto acustico. Le trombe dei comuni fonografi sono veri portavoce.

Daremo infine un cenno dello *stetoscopio*, che consiste in un imbuto fortemente svasato unito a un tubetto lungo una ventina di centimetri. Il medico se ne serve per ascoltare i rumori che si producono nel cuore o nei polmoni, appoggiando l'imbuto contro il petto del paziente e accostando l'estremità del tubo al proprio orecchio.

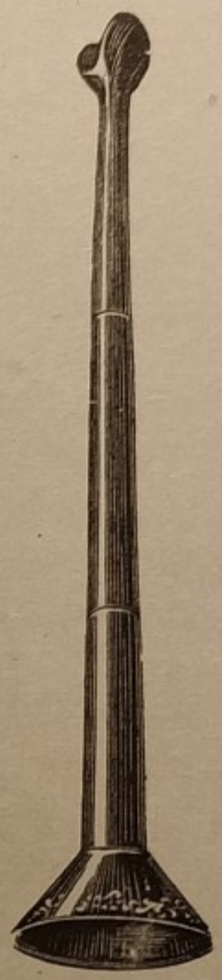


Fig. 243.

135. Suoni complessi; loro timbro; rumori. — Di solito un suono musicale non corrisponde a una serie unica di vibrazioni di frequenza determinata; fa eccezione il corista. Tutti gli altri corpi sonori, compresa la voce umana, emettono dei suoni *complessi*, ossia un miscuglio di suoni semplici, dovuti a diverse serie di vibrazioni di frequenza diversa.

Ciò si prova scrivendo col metodo noto (130) la curva caratteristica del suono che si vuol esaminare. Mentre col corista si ottiene la nota curva sinuosa semplice, con altre sorgenti le curve riescono più complesse, presentanti nelle sinuosità principali delle sinuosità più minute, dovute a suoni concomitanti più acuti. L'esame della struttura di un suono complesso è detto *analisi del suono* e si può fare, anche meglio che col metodo grafico, con la *capsula manometrica* e uno specchio ruotante. La capsula è rappresentata in prospettiva e in sezione dalle figure 244 e 245; essa è una piccola scatola divisa in due concamerazioni da una sottile membrana di caoutchouc KK. A sinistra la capsula porta un tubo a; a destra mettono capo i due tubi b e c, il primo dei quali è unito alla condotta del gas illuminante o meglio a un apparecchio ad acetilene che esce

per il tubo *c* finito in punta affilata. Il gas arde all'estremità di *c* con una fiammella chiara fusiforme, perfettamente tranquilla finchè la membrana rimane in riposo. Ma se si emette un suono davanti l'apertura *a* le compressioni e le rarefazioni d'aria agiscono sulla membrana; con ciò la pressione del gas nella camera destra della capsula aumenta e diminuisce e in conseguenza l'altezza della fiammella varia in modo continuo. Vista direttamente, la fiammella apparisce all'occhio alquanto più lunga che allo stato di riposo e perde alquanto di luminosità.

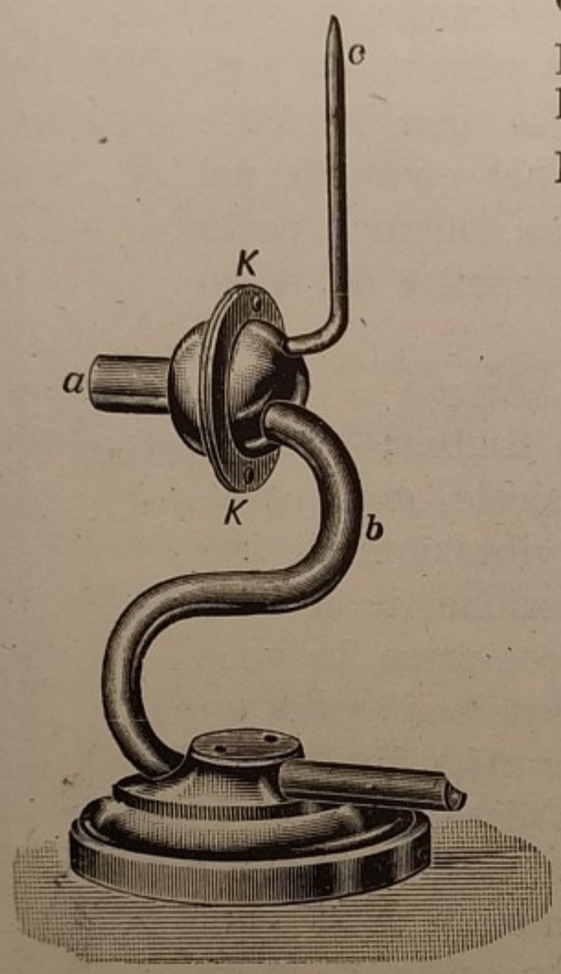


Fig. 244.

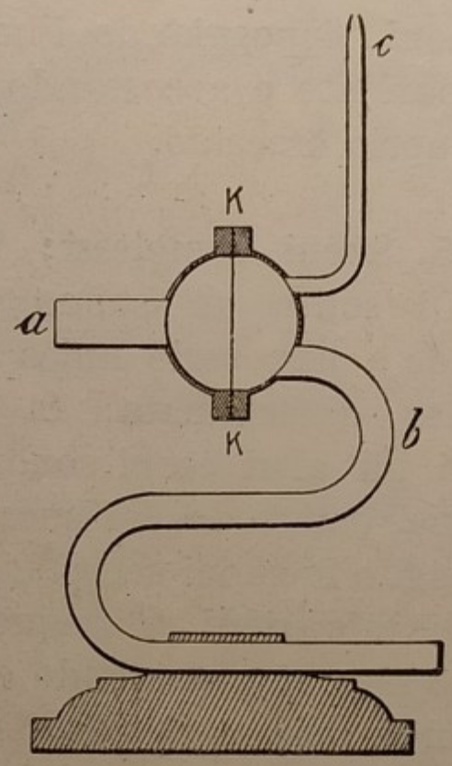


Fig. 245.

Per esaminare meglio lo stato della fiamma si fa uso di uno specchio ruotante, com'è mostrato nella figura 246. L'apparecchio comprende quattro specchi piani che formano le faccie di un parallelepipedo *A* a base quadrata, ed è messo in rotazione mediante un semplice dispositivo. La fiammella, circondata da un cilindro di vetro per sottrarla all'agitazione dell'aria prodotta dal movimento degli specchi, viene esaminata guardandone l'immagine dentro gli specchi stessi. Se essa è ferma si scorge un nastro luminoso continuo, ma tosto che si mette a vibrare si scorge una fila di immagini separate da intervalli oscuri (fig. 247).

Le dentellature del nastro luminoso sono più o meno fitte a seconda della diversa frequenza del suono esaminato e della velocità dello specchio. Se il suono è semplice le immagini della fiamma

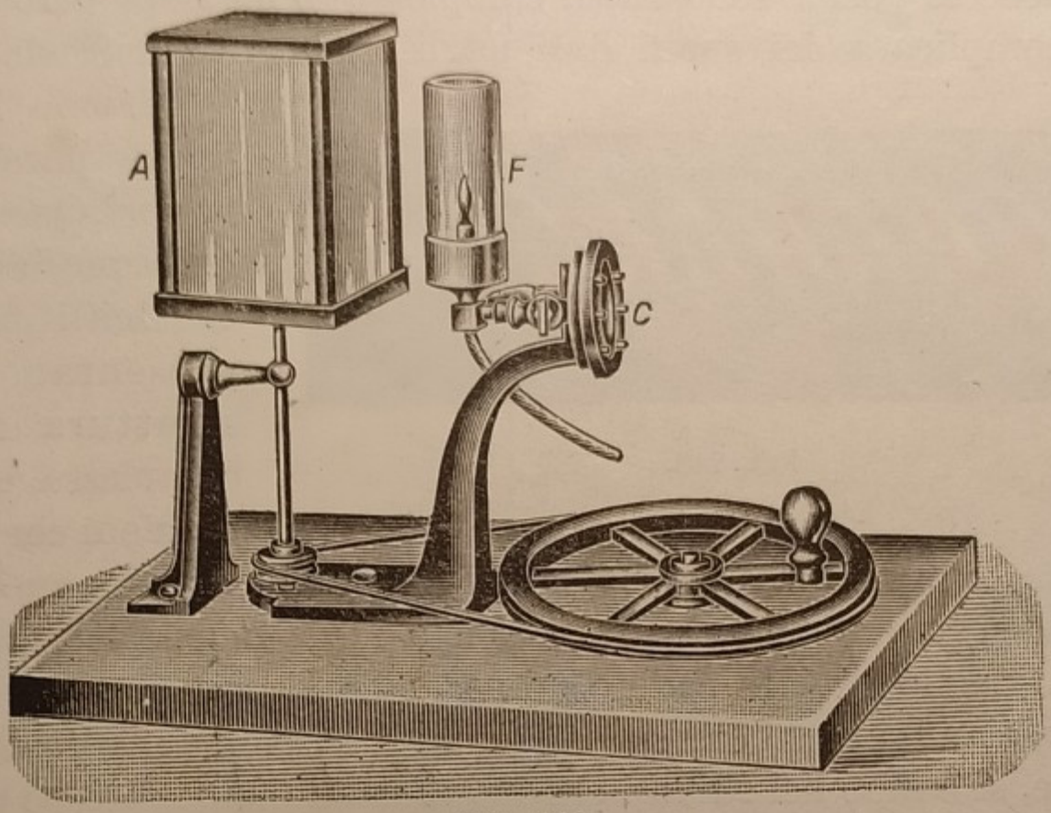


Fig. 246.

sono tutte eguali, se è complesso sono diverse. Così se il suono complesso è formato dalla sovrapposizione di due suoni semplici di frequenza 1 e 2 si ottiene la forma della figura 248.

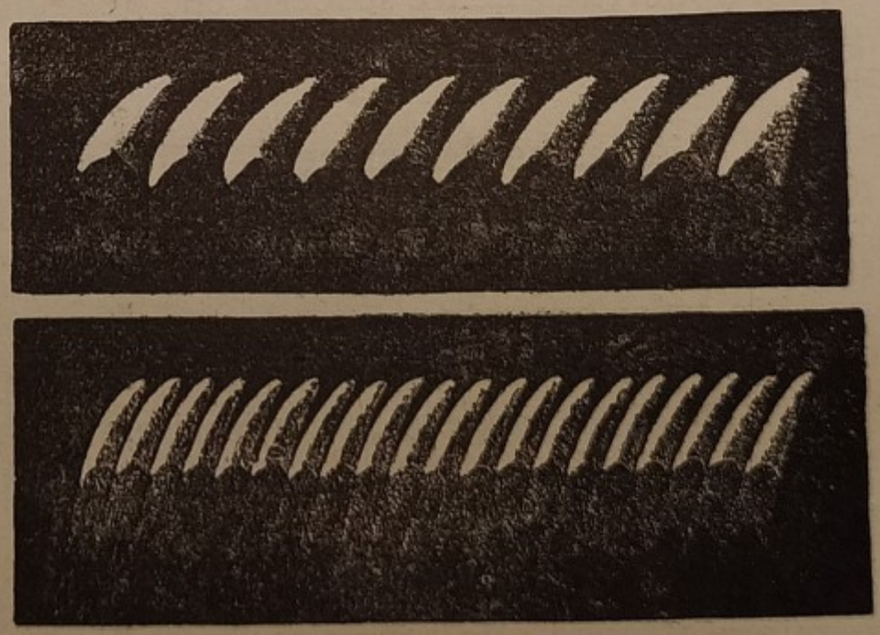


Fig. 247.

I suoni dati dagli strumenti musicali analizzati convenientemente si mostrano formati da un suono dominante semplice, più intenso, e da altri suoni più deboli e più acuti.

Fatta eguale a 1 la frequenza del suono dominante, i suoni concomitanti hanno frequenze comprese nella serie 2, 3, 4...

La diversa struttura di un suono, intesa come si è spiegato, costituisce quel carattere che in musica è detto *timbro* o anche *tempera* o *metallo*.

Anche le vocali sono suoni complessi, in maniera però anche più complicata dei suoni dati dagli strumenti musicali.

Fig. 248.

Diremo infine poche parole sui *rumori*. Questi differiscono dai suoni musicali perchè presentano una struttura molto complessa, e le vibrazioni che li originano sono in massima parte irregolari. Spesso però anche nei rumori si riscontra un carattere più o meno musicale. Un'asticella di legno lasciata cadere sul pavimento produce un rumore, ma lasciandone cadere successivamente diverse di dimensioni adatte, si hanno dei rumori che manifestano uno spiccato carattere musicale, specialmente in ordine all'altezza. Il *xilofono*, strumento non raramente ora usato nell'esecuzione di musica leggera, è formato di numerose asticelle di legno di varia dimensione, opportunamente sospese, che vengono battute dal suonatore con due piccoli martelli.

136. Riflessione del suono. — Un ostacolo, per esempio un muro, che si trovi ad una certa distanza dalla sorgente, *riflette* le onde sonore che vi arrivano, cioè le obbliga a propagarsi in senso opposto.

Senza entrare in una minuta analisi del fenomeno, supponiamo che MN rappresenti, in sezione perpendicolare col piano della figura, un ostacolo piano, come sarebbe un muro, ed O la sorgente sonora (fig. 249).

Le onde generate in O si propagano in modo continuo e regolare attorno alla sorgente fino all'ostacolo, ma qui giunte, il moto vibratorio torna indietro in modo che viene a formarsi un altro sistema di onde, dette *onde riflesse*, che hanno per centro il punto O_1, *simmetrico* di O rispetto al piano MN.

Per precisare meglio il fenomeno consideriamo un raggio qualunque sonoro OB appartenente al sistema di onde dirette e che chiameremo *raggio incidente*, ad esso corrisponde il raggio sonoro *riflesso* BC, la cui direzione passa per O_1. Ciò vuol dire che al movimento diretto che si propaga nel mezzo nella direzione OB, corrisponde un movimento riflesso secondo la direzione BC, di guisa che se in O si produce un suono di una brevissima durata, quale è un colpo di pistola, un orecchio posto in C percepisce il suono *diretto* lungo la OC, e *in seguito*

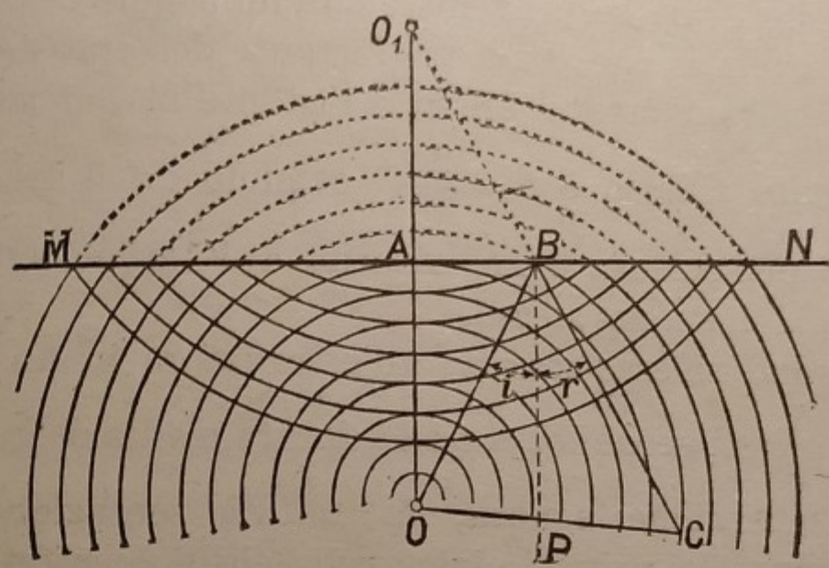


Fig. 249.

un altro suono che gli proviene apparentemente da O_1. Le cose passano come se, soppresso l'ostacolo MN, *due* colpi venissero sparati *contemporaneamente* in O ed in O_1, colpi che l'orecchio percepirebbe in tempi diversi date le diverse distanze dell'orecchio C dalle sorgenti O ed O_1.

Il meccanismo della riflessione del suono è lo stesso di quello della riflessione della luce; nel caso ora da noi considerato il piano MN fa l'ufficio di uno specchio piano dell'Ottica e le leggi della riflessione del suono coincidono con quelle della riflessione della luce:

1° *Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente nel punto d'incidenza, sono sullo stesso piano.*

2° *L'angolo di incidenza i* — l'angolo OBP — *e l'angolo di riflessione r* — l'angolo CBP — *sono eguali.*

Perciò tutti i raggi sonori emanati dalla sorgente O dànno luogo a raggi riflessi che sembrano venire da O_1; questo punto lo chiameremo *immagine sonora virtuale* di O.

137. Eco. — Si chiama *eco* la ripetizione di un suono riflesso da un ostacolo, quale un muro, una roccia, ecc.

Supponiamo un osservatore O situato davanti a una superficie piana riflettente MN ad una distanza $AO = d$. Un suono emesso dalla persona, si propaga fino all'ostacolo, e da questo viene riflesso come se provenisse dall'immagine O' (fig. 250). In tal modo il tempo che passa tra l'istante dell'emissione in O di un suono estremamente breve e l'istante in cui ritorna in O il movimento riflesso è $t = \frac{2d}{V}$, essendo $2d$ il tragitto fatto dal suono nell'andata e nel ritorno e V la velocità di propagazione del suono stesso.

Se il suono riflesso ritorna all'osservatore in un tempo più breve di $\frac{1}{10}$ di secondo, che è la durata media della *persistenza* di una sensazione sonora, la nuova sensazione prolunga semplicemente la prima, cioè quella che l'osservatore ha dal suono emesso. L'eco si ha soltanto se il suono impiega non meno di $\frac{1}{10}$ di secondo a percorrere lo spazio $2OA$; e poichè il suono nell'aria a 15° gradi percorre in $\frac{1}{10}$ di secondo 34 metri, OA deve superare 17 metri. In conclusione una persona, situata a una distanza un po' superiore a 17 metri da un muro, percepirà l'eco, se emette un *suono estremamente breve*.

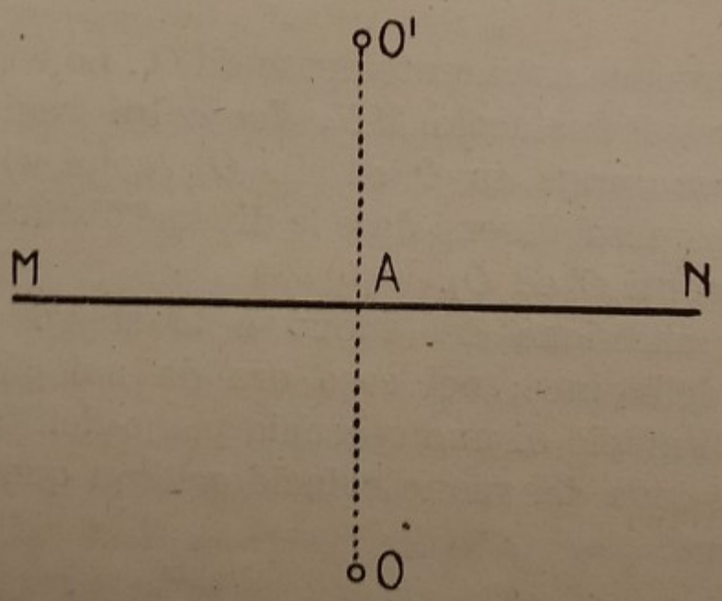


Fig. 250.

I suoni articolati esigono una distanza minima alquanto maggiore affinchè l'eco sia netta. Supposto che si percepiscano

nettamente 4 sillabe al secondo, affinchè l'audizione di una sillaba riflessa segua immediatamente l'audizione della sillaba diretta, occorre che passi $\frac{1}{4}$ di secondo fra il principio del suono diretto e il principio del suono riflesso. La distanza OA deve essere quindi tale che sia $\frac{2OA}{V} = \frac{1}{4}$; in conseguenza, per l'aria, risulta $OA = 42^{m},5$. Se si pronunziano in tal condizione più sillabe consecutive, le sillabe riflesse si sovrappongono, nell'orecchio, alle sillabe dirette, ed essendo quelle meno intense, vengono coperte da queste; solo l'ultima sillaba arriva sola, quando il suono diretto è cessato, e sembra ripetuta essa sola; si ha in tal modo l'eco *monosillabica*.

Se la distanza OA è eguale a n volte $42^{m},5$, si avrà la ripetizione di n sillabe, cioè si ha l'eco *polisillabica*.

Talora avviene che la stessa sillaba risulta ripetuta successivamente più volte, e si ha in tal caso l'eco *multipla*. Due muri paralleli alquanto distanti possono produrre l'eco multipla, nella stessa maniera che due specchi paralleli dànno delle immagini multiple. Famosa era l'eco della Simonetta, un vasto fabbricato poco lungi da Milano, che in seguito a modificazioni subìte ha perduto la sua prerogativa. Il fenomeno era prodotto da due muri paralleli, alle estremità di un cortile; un colpo di pistola, in aria calma veniva ripetuto più di 20 volte. Un fenomeno analogo si verifica nel Battistero di Pisa.

In una stanza di dimensioni ordinarie, il suono è riflesso dai muri, dal soffitto, dai mobili, che rinviano i suoni riflessi in tempi inapprezzabili, che perciò si confondono sillaba per sillaba coi suoni diretti e li rinforzano. Ma se la sala è alquanto grande i suoni riflessi non si sovrappongono esattamente ai suoni diretti e si ha il *rimbombo*, che può assumere nelle sale destinate ad audizioni musicali o nei teatri, caratteri da rappresentare uno dei più gravi inconvenienti. In tali casi si cerca di attenuare le riflessioni, coprendo i muri di drappi, sostanze non elastiche che spengono le vibrazioni.

Anche le nubi possono riflettere il suono: un colpo di cannone sparato in aperta pianura, con cielo sereno, è breve e

secco; in presenza di nubi apparisce prolungato ed acquista il carattere del rombo del tuono.

Il rombo prolungato del tuono ha la stessa origine; l'esplosione della scarica atmosferica è un fenomeno pressochè istantaneo, ma appare come un suono prolungato per la riflessione delle onde sonore sulle nubi o sugli oggetti terrestri.

138. Percezione dei suoni; l'orecchio. — L'orecchio è l'organo atto alla percezione dei suoni (fig. 251). Esso è formato di una parte esterna, che comprende il *padiglione* 1 e il *condotto auditivo* 2, atti a raccogliere e a dirigere le onde sonore fino alla membrana del timpano, che sta al fondo del condotto auditivo. Procedendo verso l'interno, dopo il timpano, si trova una cavità, che costituisce l'*orecchio medio*, nel quale si trova la *catena degli ossicini* — martello, incudine, osso lenticolare e staffa — poggianti, il primo sulla membrana del timpano, l'ultimo contro la membrana della *finestra ovale*, al di là della quale trovasi l'*orecchio interno*. Questo ha costituzione complessa: ci basti il dire che tra altri organi vi si trova un canale a forma di *chiocciola*, in cui, sopra una membrana nuotante in un liquido, stanno numerosissimi filamenti che sono le terminazioni del nervo acustico, destinato a trasmettere al cervello le sensazioni sonore.

Fig. 251.

In tal maniera le vibrazioni sonore arrivate al timpano vengono trasmesse all'orecchio interno dalla catena degli ossicini e l'eccitazione arriva ai filamenti di cui sopra si è detto. Pare che tali filamenti abbiano la proprietà di vibrare ciascuno con un determinato periodo, di guisa che, quando le onde vi arrivano, entrerebbero per risonanza (139) in vibrazione

quei filamenti che corrispondono al periodo del suono trasmesso. Da tali filamenti le sensazioni attraverso il nervo acustico raggiungerebbero il cervello.

139. Fenomeni di risonanza. — Se si hanno due corpi sonori vicini capaci di dare lo stesso numero di vibrazioni, eccitandone uno, anche l'altro, quasi per simpatia, si mette in vibrazione senza essere eccitato da una causa apparente. L'esperienza si può eseguire in scuola disponendo sul tavolo un certo numero di coristi, tutti diversi per numero di vibrazioni che son capaci di dare, tranne due che sono accordati.

Eccitando uno qualunque dei coristi, eccettuati i due ultimi, si ha una certa nota; se in seguito, poggiando la mano sul corista vibrante, lo si riduce al silenzio, si riscontra che tutti gli altri rimangono muti. Ma se si eccita uno dei due coristi accordati, fattolo subito tacere, si sente che la stessa nota è emessa dall'altro corista.

Non è difficile la spiegazione del fenomeno. Qualunque sia il corista che viene eccitato, esso dissemina nello spazio circostante la sua energia producendo nel mezzo le note onde, le quali evidentemente colpiscono tutti gli altri coristi, che così si mettono impercettibilmente a vibrare, ma le onde emesse dal corista vibrante imprimono a uno qualunque dei coristi non accordati, degli impulsi che non sono in accordo colle vibrazioni già iniziate dal corista stesso. Vale a dire, può essere che un certo impulso arrivi al corista nello stesso senso del suo movimento, ciò che ha per effetto di aumentarne momentaneamente l'ampiezza di vibrazione, ma gli impulsi che arrivano immediatamente dopo, percuotono il corista in senso contrario alle sue vibrazioni, ciò che porta al loro spegnimento.

Invece al corista che è accordato con quello già posto in vibrazione, gli impulsi arrivano successivamente tutti nello stesso senso del movimento già iniziatosi, e gli effetti di tali impulsi si sommano, sicchè il secondo corista acquista un'ampiezza di oscillazione notevole.

Il fenomeno si compie collo stesso meccanismo di altri che si incontrano nella vita ordinaria. Senza grande sforzo si può mettere in moto la massa pesante di una campana, purchè si

dia alla corda degli strappi ad eguali intervalli, secondando il moto oscillatorio proprio della campana stessa. Nello stesso modo i muratori, per rovesciare un muro, lo urtano ad intervalli facendo nascere in esso delle oscillazioni via via crescenti, che essi secondano e che determinano la caduta.

Una sola persona, posta in mezzo ad un ponte sospeso, dando ai suoi sforzi un ritmo conveniente, potrebbe imprimergli delle oscillazioni pericolose. Per tal ragione si fa rompere il passo alla truppa che debba passare sopra un ponte sospeso; nel 1850 il ponte sospeso di Angers si ruppe sotto il passo cadenzato di un battaglione di soldati, dei quali 219 trovarono la morte.

Se invece tali urti si succedono ad intervalli non eguali alla durata delle vibrazioni proprie del corpo, questo resta quasi in riposo.

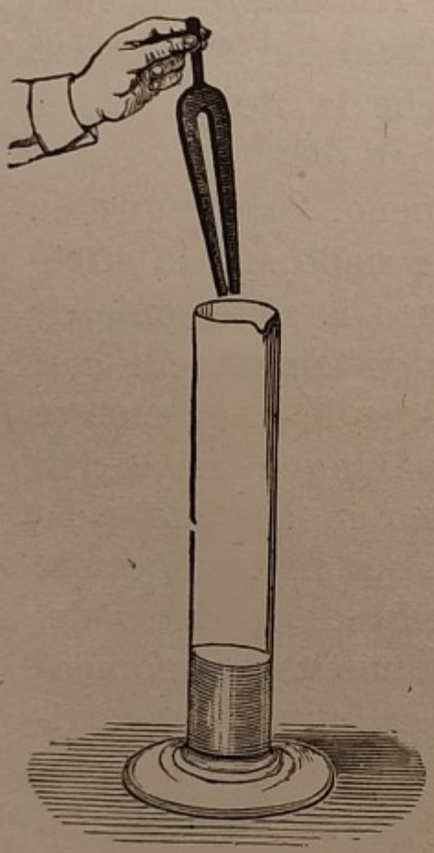


Fig. 252.

Vediamo ancora un altro fatto relativo alla risonanza acustica. Un corista vibrante viene accostato all'apertura di una provetta. La colonna d'aria contenutavi entrerà per conseguenza a vibrare, ma in generale debolmente, e il suono ne viene appena sensibilmente rinforzato (fig. 252).

Se allora si versa lentamente dell'acqua nella provetta, con che si modifica la lunghezza della colonna d'aria, questa finirà per compiere delle vibrazioni assai ampie, e aggiungendo il suo suono a quello debole del corista si avrà un notevole rinforzo. In tale condizione la colonna d'aria vibra d'accordo col corista; e la teoria dimostra che il fenomeno acquista la massima intensità quando la colonna d'aria abbia una lunghezza eguale a ¼ della lunghezza d'onda corrispondente al suono del corista (132). Rinforzi, ma più deboli, si hanno anche per tutti gli altri valori della colonna d'aria eguali a un numero dispari di quarti d'onda.

Le casse di risonanza di cui son forniti tutti gli strumenti a corda utilizzano lo stesso fenomeno.

Un corista vibrante sostenuto colla mano dà un suono assai debole, ma lo dà assai più intenso quando venga montato su una cassa di risonanza, come quello della fig. 238, e il rinforzo massimo si ha quando la lunghezza della cassa equivale a un quarto della lunghezza d'onda del suono emesso dal corista; e finiamo col dire che nelle radiotrasmissioni viene largamente sfruttato il fenomeno di risonanza elettrica sotto il nome di *sintonia*.

140. Intervalli musicali. — La percezione simultanea o successiva di due suoni produce nel nostro orecchio una impressione che non dipende dalla loro altezza assoluta, ma dal loro *intervallo*.

Se si producono quattro suoni, tali che l'intervallo fra i due primi A e B sia *giudicato dall'orecchio* eguale a quello fra gli altri due A' e B', si rileva, misurando la frequenza delle vibrazioni a, b, a', b' che corrispondono ai quattro suoni, che il rapporto $\frac{a}{b}$ è eguale al rapporto $\frac{a'}{b'}$. Perciò in Acustica si chiama *intervallo fra due suoni il rapporto delle loro frequenze, ossia dei numeri di vibrazione per secondo*. È invalso l'uso di prendere per numeratore il numero delle vibrazioni del suono più acuto, con che un intervallo è sempre espresso da un numero non inferiore ad uno.

Il nostro orecchio è gradevolmente impressionato da due suoni successivi o simultanei, solo quando i loro intervalli siano dei rapporti semplici. Perciò i suoni musicali formano delle serie nelle quali entrano solo degli intervalli particolari.

I musicisti apprezzano il valore degli intervalli ad orecchio, i Fisici misurando, coi metodi esposti, i numeri delle vibrazioni.

L'emissione simultanea di due o più suoni, separati da intervalli musicali, dà un *accordo*.

L'accordo è *consonante* se produce una sensazione gradevole all'orecchio, altrimenti è *dissonante*. Il numero degli intervalli consonanti è assai ristretto: il più consonante è l'*unisono* $= \frac{1}{1}$; poi vengono l'intervallo di *ottava* $= \frac{2}{1}$; di

quinta $= \frac{3}{2}$; di *quarta* $= \frac{4}{3}$; di *terza maggiore* $= \frac{5}{4}$; di *terza minore* $= \frac{6}{5}$.

Due suoni formano un accordo armonioso quando il loro intervallo è misurato da numeri interi molto piccoli.

Quattro suoni i cui numeri di vibrazione stanno come 4 : 5 : 6 : 8 formano il così detto accordo *perfetto maggiore*; se i numeri di vibrazione stanno come 10 : 12 : 15 : 20 si ha l'*accordo perfetto minore*.

141. Scale musicali. — La *scala* o *gamma* musicale è una successione di suoni di determinata altezza, cioè tali i cui numeri di vibrazione stanno fra loro secondo determinati rapporti.

La *scala naturale* comprende 7 suoni principali, i cui numeri di vibrazione stanno fra loro come:

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8};$$

il più grave di questi si dice *fondamentale*. Il numero delle vibrazioni del primo è del tutto arbitrario, l'impressione che la scala determina sull'orecchio è da tal numero indipendente.

A tali suoni si dà il nome di *note* e sono, in ordine ai rapporti eg ıati:

do, re, mi, fa, sol, la, si.

Queste note entrano a formare un'*ottava*, e siccome la scala può estendersi dalle due parti, cioè si possono avere diverse ottave, le note di queste sono contrassegnate con indici diversi. Così avremo un'ottava con le note:

$$do_1,\ re_1,\ mi_1,\ fa_1,\ sol_1,\ la_1,\ si_1;$$

l'ottava seguente comprenderà le note:

$$do_2,\ re_2,\ mi_2,\ fa_2,\ sol_2,\ la_2,\ si_2;$$

e quella precedente le note:

$$do_{-1},\ re_{-1},\ mi_{-1},\ fa_{-1},\ sol_{-1},\ la_{-1},\ si_{-1}.$$

Le note che fanno parte della musica costituiscono circa 8 ottave a partire dal do_{-2}, dato dalla canna più grande dell'organo e corrispondente a 16,31 vibrazioni complete al secondo, fino al re_7 a cui compete una frequenze di 4698. I pianoforti si estendono dal la_{-2} al do_7, cioè da una frequenza di 81,54 a una frequenza di 4176. L'estensione della voce umana raramente oltrepassa due ottave.

Siccome poi l'orecchio apprezza benissimo degli intervalli anche minori di quelli esistenti fra le note sopra esposte, si è sentito il bisogno di arricchire la serie aggiungendovi i *bemolli* e i *diesis*, cioè delle note che sono un po' più basse o un po' più alte di quelle sopra citate, nel rapporto di 25 a 24.

Per esempio il *do diesis* — *do*♯ — *ha* $\frac{25}{24}$ delle vibrazioni che competono al *do*, il *re bemolle* — *re*♭ — ne ha $\frac{24}{25}$ di quante ne ha il *re*.

Questa è la scala naturale seguita da chi non è iniziato agli studi musicali, e canti ingenuamente senza essere accompagnato da alcun strumento. Ma per certe esigenze di tecnica musicale e particolarmente per non essere costretti a complicare enormemente la struttura degli strumenti a suoni fissi, quali il piano, l'organo e l'armonium, si segue generalmente la scala *temperata*.

Essa si ottiene dividendo l'intervallo di ottava $= \frac{2}{1}$, in 12

Fig. 253.

intervalli eguali, detti *semitoni*, ciascuno dei quali ha perciò il valore di:

$$\sqrt[12]{2} = 1{,}05946\,.$$

In tal modo nella tastiera del piano si hanno 12 tasti per ciascuna ottava, 7 bianchi e 5 neri (fig. 253).

Ci basta di aver toccato l'argomento delle scale musicali senza estenderci in ulteriori considerazioni, accessibili solo a chi ha speciali attitudini e conoscenza della musica.

Finiamo questi cenni col dire poche parole sugli *armonici*, i cui numeri di vibrazione stanno fra loro come la serie naturale dei numeri interi 1, 2, 3, 4, 5... Perciò se il 1° armonico è chiamato do_1, la serie è così disposta:

1	2	3	4	5	6	7	8.....
do_1	do_2	sol_2	do_3	mi_3	sol_3	$si\flat_3$	do_4.....

Gli armonici godono in musica di una importanza speciale; in modo particolare essi intervengono a formare il timbro dei suoni (135). Nella breve esposizione fatta delle scale musicali abbiamo soltanto parlato di rapporti fra i numeri delle vibrazioni. Quanto al valore assoluto di questi numeri la cosa sarebbe indifferente se si trattasse di un pezzo di musica sonato da un solo strumento o cantato da una sola voce; infatti un pezzo di musica non muta sostanzialmente venendo cantato dalla voce grave del basso o dalla voce acuta del soprano.

Ma se si vogliono eseguire dei pezzi a più voci o con più strumenti, è chiaro che bisogna prendere le mosse da un punto di partenza comune, cioè accordare tutti gli strumenti con una stessa nota di altezza determinata. La nota da tutti adottata è il la_3, che corrisponde a 435 vibrazioni complete al secondo, ed è data da un corista che si chiama perciò corista o diapason *normale*.

Per l'Italia il corista normale è conservato nell'Istituto Fisico dell'Università di Roma, al quale si può ricorrere quando interessi di far eseguire dei controlli esatti.

142. Cenno sulla riproduzione dei suoni. — La riproduzione dei suoni viene eseguita particolarmente con tre metodi: il metodo *meccanico*, il metodo *ottico* e il metodo *magnetico*. Il metodo ottico è oggi esclusivamente adoperato nel Cinema sonoro, dove si richiede un assoluto sincronismo fra il movimento delle immagini proiettate e i suoni e le voci relative, ma questo metodo, come quello magnetico, richiede l'applicazione di fenomeni elettrici abbastanza complessi. Ci limitiamo perciò a un breve cenno del primo.

La riproduzione meccanica dei suoni è fatta col *fonografo*. Riportiamoci al cilindro affumicato che ci ha servito per l'iscrizione della curva di vibrazione di un corpo sonoro; l'Edison ebbe infatti la felice idea di sostituire al cilindro affumicato un cilindro di sostanza plastica, contro il quale poggiava la punta scrivente. La parte essenziale è una membrana elastica *aa* di vetro assai sottile (fig. 254) che chiude il fondo di una cavità svasata *B* davanti alla quale si produce il suono. La membrana vibra all'unisono coi movimenti oscillatori trasmessile dall'aria.

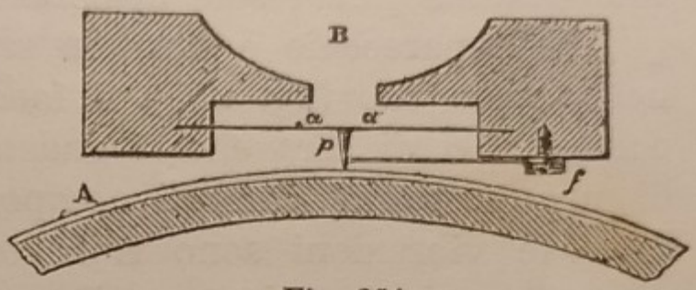


Fig. 254.

Una punta *p*, fissata perpendicolarmente alla membrana appoggia col suo estremo libero sopra un cilindro di cera *A* levigatissimo. Questo cilindro è montato meccanicamente come il cilindro affumicato della figura 240. In tal modo la punta, finchè è immobile traccia nella cera un leggero solco elicoidale di profondità costante. Se la membrana vibra, la punta iscrive nella cera delle sinuosità che hanno profondità, numero e forma corrispondenti all' intensità, all'altezza e al timbro del suono emesso. Così si ottiene un *fonogramma*, che può esser tolto e conservato.

Fig. 255.

Per la riproduzione dei suoni iscritti, si rimette a posto il fonogramma e si sostituisce la scatola scrivente, con un'altra *ripetitrice*, che differisce dalla prima solo per il fatto che la sua punta è alquanto smussata per non alterare il solco già

inciso. Il cilindro è rimesso in moto nello stesso senso e con la stessa velocità di prima, di modo che la punta, seguendo il fondo del solco tracciato, è obbligata a eseguire con tutte le particolarità, i movimenti compiuti dalla punta scrivente. Questi movimenti sono comunicati alla membrana, che così ripete le vibrazioni del tracciato e riproduce esattamente i suoni primitivi. Rinforzati da una tromba acustica (134), i suoni possono essere intesi da un numeroso uditorio. Lo stesso fonogramma può essere utilizzato per successive riproduzioni.

Tale apparecchio è stato in seguito felicemente modificato nel *grammofono* (fig. 255). I fonogrammi non sono più fatti con cilindri di cera che si guasta facilmente, ma con dischi di una sostanza dura di composizione piuttosto complessa, dove le vibrazioni sono riprodotte lungo un solco a spirale piana, restringentesi verso il centro. Il disco viene montato sopra una piattaforma orizzontale, mossa da un meccanismo d'orologeria o elettrico, con velocità regolabile. Una membrana elastica, portata da una scatola cilindrica, è fatta vibrare da una piccola punta di ferro colla quale è unita. La scatola è in comunicazione colla tromba per mezzo di un tubo girevole attorno a un asse verticale, di guisa che la punta durante la rotazione del disco ne può seguire il solco tracciato.

Ma anche qui il primo fonogramma viene iscritto sopra un disco di sostanza plastica; da questo si ottiene un disco di metallo nel quale alle cavità del solco del disco di cera corrispondono dei rilievi e viceversa, e col disco metallico, che è, si può dire, la negativa del disco primitivo, si stampano per pressione i dischi comuni nei quali cavità e rilievi ritornano nel senso del disco primitivo.

OTTICA

L'*Ottica* è la parte della Fisica che si occupa dei fenomeni luminosi.

143. Propagazione della luce. — I Fisici procedendo a confronti accurati fra i fenomeni sonori e quelli luminosi sono sono stati condotti ad ammettere l'*ipotesi* che anche la luce debba aver origine in un movimento vibratorio propagantesi in un mezzo elastico. Ma poichè la luce si propaga anche nel vuoto, è stato necessario introdurre una *seconda ipotesi*, quella dell'esistenza d'un mezzo speciale chiamato *etere cosmico* o *universale*, suscettibile di entrare in vibrazione e che riempie gli intervalli intermolecolari dei corpi come pure tutto lo spazio interplanetario e interstellare.

Le vibrazioni luminose determinano nell'etere circostante la formazione di *onde*, analoghe alle onde sonore che si formano nei mezzi materiali trasmettenti il suono, e anche nelle onde luminose riscontriamo gli stessi caratteri delle onde sonore, particolarmente la frequenza e la lunghezza d'onda.

Se la luce si propaga in un mezzo omogeneo indefinito, le onde sono sferiche attorno al corpo luminoso che ne occupa il centro e i *raggi luminosi* son tutte le semirette uscenti dal centro; possiamo anche dire che la luce in tal caso *si propaga in linea retta.*

Numerosi fatti provano la propagazione rettilinea della luce, per esempio, un pennello di luce solare che penetra in una stanza buia attraverso a un piccolo foro di una imposta è rettilineo, come apparisce dalla traccia che lascia illuminando il pulviscolo atmosferico sempre presente nell'aria.

144. Ombre. — La formazione delle *ombre* dipende anche dalla propagazione rettilinea della luce.

Supponiamo, per semplicità, che la sorgente luminosa L sia tanto piccola da potersi considerare come un punto, e ad una certa distanza da essa si trovi una sfera opaca AB (fig. 256).

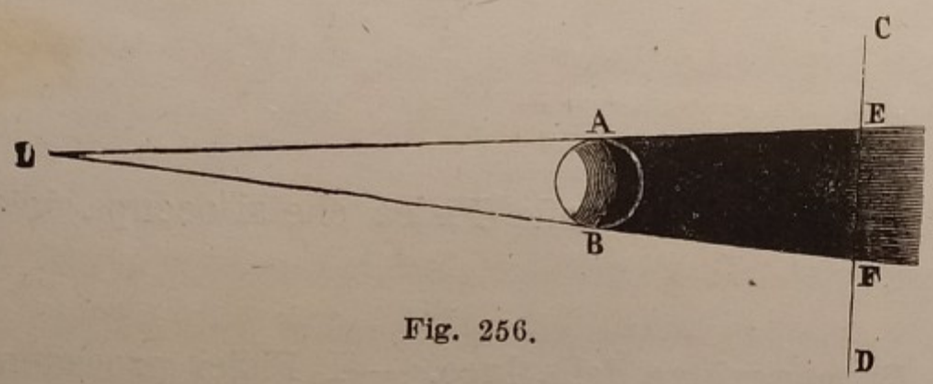


Fig. 256.

Segnato il cono che ha per vertice il punto L ed è tangente alla sfera AB, si comprende che nessun raggio proveniente da L penetra nel cono al di là del corpo opaco; cosicchè sopra uno schermo bianco CD, posto perpendicolare all'asse del cono accennato, si disegnerà un cerchio d'ombra, detta *ombra portata*, a contorni ben precisi. Fuori del detto cerchio il campo dello schermo è illuminato.

Così si hanno ombre a contorno deciso, mettendo un oggetto opaco qualunque davanti a una lampadina elettrica tascabile, perchè tal lampada è una sorgente luminosa di piccole dimensioni da poter rientrare nelle condizioni precedenti.

Se invece la sorgente ha dimensioni non trascurabili, come è il caso, ad esempio, di una lampada elettrica a globo smerigliato piuttosto grande, il fenomeno si complica alquanto. Siano infatti AB e CD due sfere rispettivamente luminosa e opaca (fig. 257); si conducano le tangenti *esterne* come ACE, BDE che formano un cono di vertice E; si conducano poi le tangenti *interne*, come ADG e BCF. I punti compresi nel cono CDE non ricevono affatto luce da nessun punto della sfera

luminosa; ma fuori del detto cono, al di là della sfera opaca, esiste uno spazio, i punti del quale ricevono dalla sorgente una quantità di luce in misura variabile e crescente quanto più sono distanti dal cono *CDE* fino ad essere illuminati da tutta la sorgente al di fuori del cono formato dalle tangenti interne.

Cosicchè nello spazio fra i due coni si avrà un'ombra degradante fino alla luce completa, si ha cioè la *penombra*. Uno

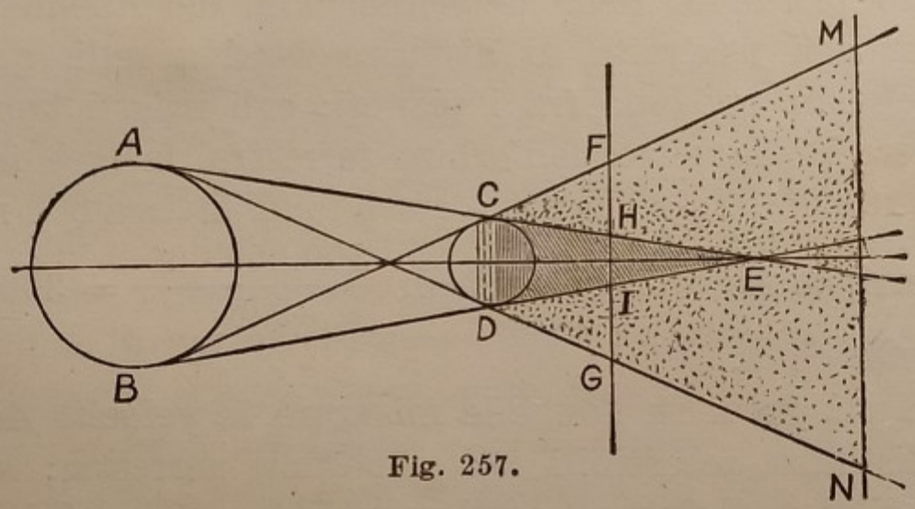


Fig. 257.

schermo posto in *FG* mostrerà in *HI* una regione d'ombra completa, intorno a questa una zona di penombra lentamente degradante verso l'esterno. Uno schermo posto in *MN* dopo il vertice *E* del cono d'ombra, mostrerà solo la penombra, degradante pure come nell'altro caso.

Il meccanismo delle ombre ora esposto rende ragione delle *eclissi*. Nelle eclissi di Luna, questo corpo passa nel cono d'ombra terrestre immergendovisi ora tutta — eclisse *totale* — ora in parte — eclisse *parziale*.

Nelle eclissi di Sole, se il cono d'ombra della Luna incontra una regione della superficie terrestre, per i punti di tale regione il Sole cessa di esser visibile — eclisse *totale* di Sole — e per i punti della Terra che si trovano nel cono di penombra il Sole è visibile solo in parte — eclisse *parziale* —. In certi casi poi, che possono verificarsi per ragione delle distanze variabili fra il Sole, la Terra e la Luna, il vertice del cono d'ombra lunare può non arrivare fino alla Terra, e allora i luoghi che sono prossimi all'asse del detto cono godono lo spettacolo dell'eclisse *anulare* del Sole.

145. Velocità della luce nel vuoto e nei mezzi materiali. — Galileo fu il primo a porre la questione se la luce impiegasse un tempo a percorrere una distanza, ma non riuscì a risolverla per insufficienza di mezzi.

Spetta all'astronomo danese Roemer (1676) il merito di avere, per primo, provato, con un *metodo astronomico*, che la luce impiega un tempo brevissimo, ma finito, a percorrere uno spazio.

L'esito fortunato delle determinazioni del Roemer dipende dall'aver egli usufruito di distanze assai grandi, quali sono quelle che intercedono fra i pianeti; egli infatti trovò che a percorrere il diametro dell'orbita terrestre, la luce impiegava $986^s = 16^m.26^s$. Tale diametro essendo all'incirca 300 milioni di chilometri, si ha una velocità di $\frac{300.000.000}{986} = 300.000$ km. al secondo circa.

Molto più tardi fu possibile misurare la velocità della luce, entro distanze accessibili alla superficie terrestre; e i corrispondenti metodi furono detti metodi *terrestri* o *fisici*.

I risultati ottenuti si accordano abbastanza bene con quelli del Roemer. Fra le misure più recenti vanno ricordate quelle dell'americano Michelson, che trovò una velocità di chilometri 299799 con un errore in più o in meno di 4 chilometri. Tale è anche la velocità nel vuoto; ma negli altri mezzi materiali è diversa dall'uno all'altro; così nell'acqua è di 225 mila, nel vetro di 200 mila chilometri. La velocità della luce è intimamente legata a una costante ottica del mezzo, che vien detta indice di rifrazione, come si dirà al § 199.

La velocità della luce è di gran lunga superiore a tutte le altre; si crede che essa sia la massima possibile.

Un proiettile può assumere una velocità che arriva al massimo a 1500 m. al secondo. Il moto di traslazione della Terra si compie con una velocità media di 29 km, 7 al secondo. La distanza Sole-Terra è percorsa dalla luce in $493^s = 8^m.\ 13^s$. Le stelle fisse hanno dalla Terra distanze grandissime che la luce impiega anni ed anni a percorrere.

È quindi logico che gli Astronomi abbiano deciso di adottare come unità di distanza delle stelle l'*anno-luce*, vale a dire la

distanza percorsa dalla luce negli spazi siderali in un anno; essa equivale a circa 9460 miliardi di chilometri. La stella fissa più vicina alla Terra è la *Proxima* del Centauro alla distanza di *tre anni e otto mesi-luce!*

Fotometria.

146. Intensità luminosa. - Legge di Keplero. — La quantità di luce emessa dalle diverse sorgenti luminose è diversa, ma possiamo ritenere che due sorgenti emettano la stessa quantità di luce, ossia che abbiano la stessa *intensità luminosa* o *potere illuminante*, se, a giudizio del nostro occhio, producono la stessa illuminazione sopra una stessa superficie situata da esse ad eguale distanza. Presa allora una determinata lampada, la cui intensità per convenzione è presa come unità di misura, riterremo che una sorgente formata dalla riunione di 2, 3, 4... lampade eguali a quella campione, abbia una intensità luminosa 2, 3, 4... In generale un gruppo m di lampade eguali a quella unitaria, formano una sorgente di intensità m.

Ciò posto, se vogliamo confrontare la intensità luminosa di una qualunque sorgente, per esempio di una certa lampada elettrica, con quella di una candela, osserveremo la illuminazione prodotta dalla lampada elettrica sopra uno schermo bianco posto alla distanza di 1 m., cercando in seguito quante candele si devono porre a distanza di 1 m. dallo schermo per avere la stessa illuminazione. Se per ottenere l'effetto voluto ci vogliono 5 candele, la lampada elettrica ha l'intensità di 5 candele. Ma il procedimento è facilitato da una importante legge che è la base della *Fotometria*, scopo della quale è il confronto di una sorgente con un'altra scelta come unità.

La distanza della sorgente dallo schermo ha sulla illuminazione prodotta una importanza di prim'ordine, poichè è evidente che una stessa sorgente produce sullo schermo una

illuminazione tanto maggiore quanto minore è la sua distanza.

Il fenomeno è regolato dalla *legge di Keplero*:

L'illuminazione prodotta da una sorgente luminosa sopra una superficie è inversamente proporzionale al quadrato della distanza della sorgente dalla superficie stessa; o anche: *le intensità luminose di due sorgenti che producono la stessa illuminazione sopra una superficie, a parità di atlre condizioni, eccet-*

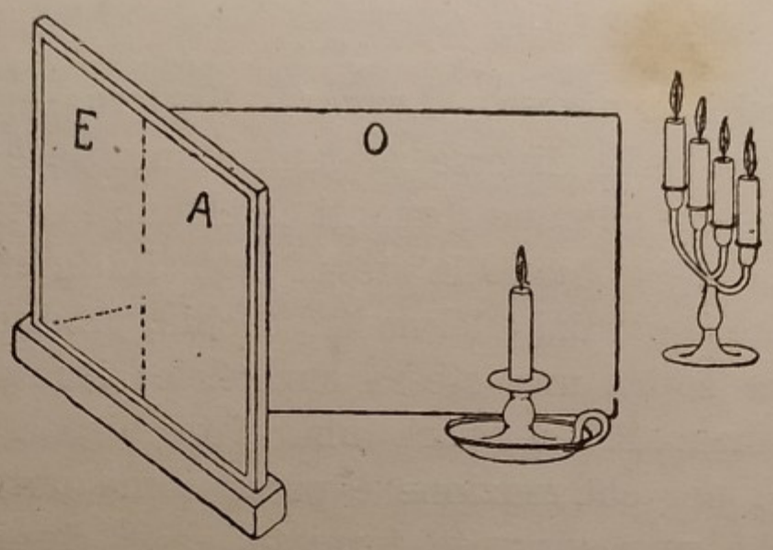


Fig. 258.

tuata la distanza, sono direttamente proporzionali ai quadrati delle distanze delle sorgenti dalla superficie.

Tal legge è rigorosa soltanto per sorgenti luminose puntiformi e si può dedurre con semplice ragionamento d'indole geometrica. Noi ci accontentiamo di darne una prova sperimentale. Prendiamo due sorgenti luminose costituite l'una da una candela, l'altra da quattro candele, e poniamole dietro un vetro smerigliato, disposto verticale, facendo in modo che con un opportuno tramezzo opaco *O* (fig. 258) ciascuna sorgente possa illuminare soltanto una metà del vetro stesso. Avvicinando o allontanando le due sorgenti si riesce a illuminare egualmente le due metà *E* e *A* del vetro. Ciò ottenuto, si riscontra che la sorgente formata dalle *quattro* candele è a distanza *doppia* dell'altra. E se al gruppo di quattro candele ne sostituiamo uno di nove, a parità di illuminazione di *E* e di *A*, si trova che la distanza delle *nove* candele è *tripla* dell'altra.

147. Fotometro Bunsen. — Sopra un regolo graduato (fig. 259), sorrette da supporti scorrevoli, sono poste le due sorgenti $I_1 I_2$ che si vogliono confrontare e di mezzo un piccolo schermo S, formato di un foglio di carta, teso entro un telaio, con una macchia d'unto nel mezzo; i centri delle due sorgenti e della macchia d'unto sono collineari. Spostando convenientemente

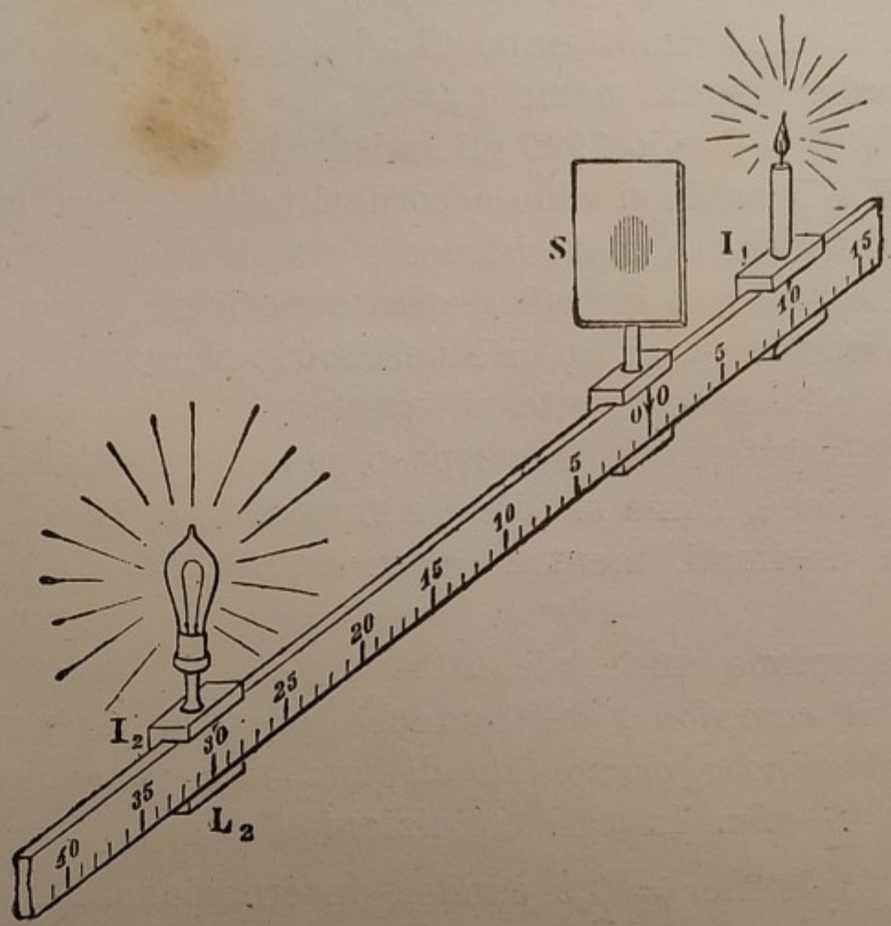


Fig. 259.

le due sorgenti o il piccolo schermo, non è difficile trovare una posizione nella quale l'occhio vede sparire la macchia d'unto. In tali condizioni, come si può provare con precedenti prove, le due sorgenti illuminano egualmente lo schermo; si può quindi senz'altro applicare la legge di Keplero. Indicando con I_1 ed I_2 le intensità luminose delle sorgenti, e con d_1 e d_2 le rispettive distanze, abbiamo:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}.$$

148. Campioni di luce. — Per misurare l'intensità di una lampada occorre paragonarla ad un'altra *campione*, presa per convenzione come unità; ma nessun campione finora proposto presenta assoluta costanza. Le minori variazioni competono al *campione Violle*, che è *l'intensità di luce inviata, in direzione normale, da* 1 *cm*² *della superficie di un bagno di platino fuso alla temperatura di solidificazione* (1755°). Ma questo campione non è pratico sopratutto per il suo costo elevatissimo, perciò si è convenuto in un primo tempo di adottare come unità la *candela decimale*, definita come $^1/_{20}$ del campione Violle.

Più tardi, il 1° luglio 1909 gli Istituti interessati di America, Inghilterra e Francia si sono accordati nell'adottare la *candela internazionale*, che è materialmente rappresentata da speciali lampade elettriche a incandescenza depositate presso gli Istituti sopra nominati, ai quali è necessario ricorrere se si vuole una copia della candela internazionale.

La candela internazionale è poco più piccola della candela decimale, poichè, come si disse, a formare 1 Violle occorrono 20 candele decimali, mentre occorrono 20,113 candele internazionali.

Come campione materiale assai pratico si usa spesso nei laboratori il *campione*, detto anche *candela*, Hefner, che è *l'intensità luminosa orizzontale di una fiamma ad acetato di amile alta* 40 *mm*. In tali condizioni

1 hefner = 0,9 candele internazionali.

149. Intensità di illuminazione. — Nella pratica, ciò che più interessa è la illuminazione degli oggetti, perchè da essa soltanto dipende la loro visibilità. Ed è detta *unità di intensità di illuminazione la illuminazione prodotta da* 1 *candela internazionale sopra una piccola superficie normale ai raggi della sorgente, posta alla distanza di* 1 *m*. Tale unità è detta *candela-metro* o anche *lux*.

L'illuminazione prodotta dal Sole, sopra uno schermo esposto perpendicolare ai raggi, equivale a 62.000 candele-metro; quella della Luna piena, nelle stesse condizioni, è $^1/_5$ di candela-metro. Vale a dire la illuminazione prodotta dalla Luna piena sulla Terra è 300.000 volte inferiore a quella prodotta dal Sole.

150. L'illuminazione varia con la inclinazione dei raggi. — Nelle precedenti questioni abbiamo sempre supposto che i raggi di una sorgente cadessero perpendicolarmente sulla superficie illuminata. Con raggi non perpendicolari l'illuminazione prodotta è minore e tanto minore quanto maggiore è l'*angolo d'incidenza* dei raggi, cioè l'angolo formato dal raggio incidente sulla superficie con la perpendicolare a questa condotta per il punto di incidenza.

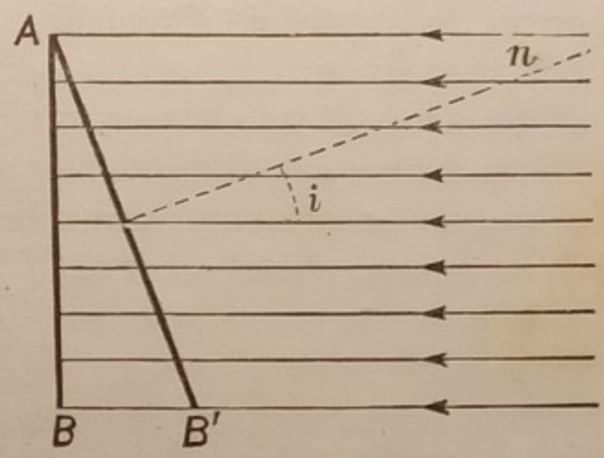


Fig. 260.

Possiamo renderci ragione del fatto col seguente ragionamento. Sia AB una superficie piana investita perpendicolarmente da un fascio di raggi paralleli (fig. 260) e sia AB' un'altra superficie obliqua, per la quale l'angolo d'incidenza dei raggi sia i e che abbia tale estensione da raccogliere esattamente tutti i raggi che colpivano la superficie AB. È evidente che l'area di AB' supera quella di AB e tanto più quanto maggiore è l'angolo i. Ma la quantità di luce ricevuta è sempre la stessa, quindi quanto maggiore è l'area della superficie su cui deve distribuirsi, tanto minore sarà l'illuminazione prodotta.

Il fatto esposto spiega anche le variazioni annue e diurne della temperatura nei diversi luoghi della Terra, che sono colpiti dai raggi solari con diversa inclinazione nelle diverse epoche dell'anno e nelle diverse ore del giorno.

Riflessione della luce.

151. Leggi della riflessione. — Se si pratica un piccolo foro nell'imposta di una camera buia, un raggio di Sole che penetra per quel foro è reso visibile, come si disse, dal pulviscolo atmosferico, in forma di un pennello rettilineo. Se facciamo cadere il raggio

sopra uno specchio lo vedremo rinviato in una determinata direzione; il raggio, come si dice, viene riflesso. Il raggio che cade sullo specchio è detto raggio *incidente*; quello rinviato dallo specchio, raggio *riflesso*.

Funziona da specchio qualunque superficie ben levigata, com'è la superficie libera di un bagno d'acqua o di mercurio. Gli specchi antichi erano lamine metalliche, ordinariamente di bronzo; gli specchi comuni sono lastre di vetro sopra una faccia delle quali si trova ben aderente uno strato di amalgama di stagno o meglio uno strato ben uniforme e continuo di argento depositatovi chimicamente.

Si possono avere specchi *piani* e *curvi*; le leggi della riflessione sono però le stesse.

Prendiamo momentaneamente in esame uno specchio piano, di cui AB (fig. 261) rappresenta la traccia col piano della figura. Nomineremo senz'altro con AB lo specchio.

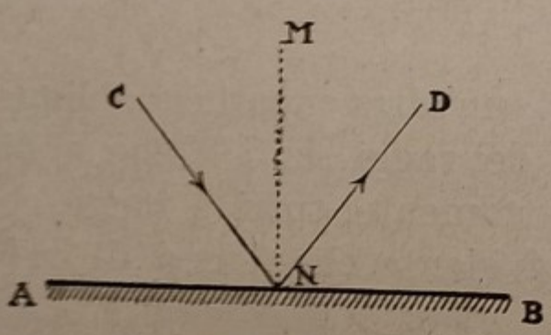


Fig. 261.

Il raggio CN incidente colpisce lo specchio nel punto N — *punto d'incidenza*; ND è il raggio riflesso. Condotta la normale MN allo specchio nel punto di incidenza, diremo angoli d'*incidenza* e di *riflessione*, gli angoli formati rispettivamente dal raggio incidente e dal raggio riflesso con la detta normale.

Le leggi della riflessione sono le seguenti: 1° *Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale allo specchio nel punto d'incidenza giaciono nello stesso piano*; 2° *L'angolo di riflessione è eguale all'angolo d'incidenza.*

In particolare se l'angolo d'incidenza è zero, vale a dire se il raggio incidente incontra normalmente lo specchio, è zero anche l'angolo di riflessione, quindi il raggio riflesso tornerà indietro seguendo in senso inverso la retta percorsa dal raggio incidente. È questo il caso della *incidenza normale*.

152. Specchi piani. — È noto a tutti che mettendosi davanti a uno specchio piano appariscono al di là di esso gli og-

getti posti davanti. Il fenomeno è facilmente spiegabile. Sia aa (fig. 262) uno specchio piano ed S un punto luminoso postogli davanti. Consideriamo vari raggi incidenti quali SA_1, SA_2, SA_3, ... ai quali corrispondono i raggi riflessi, segnati in base alle leggi della riflessione, A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3, ... Sarebbe

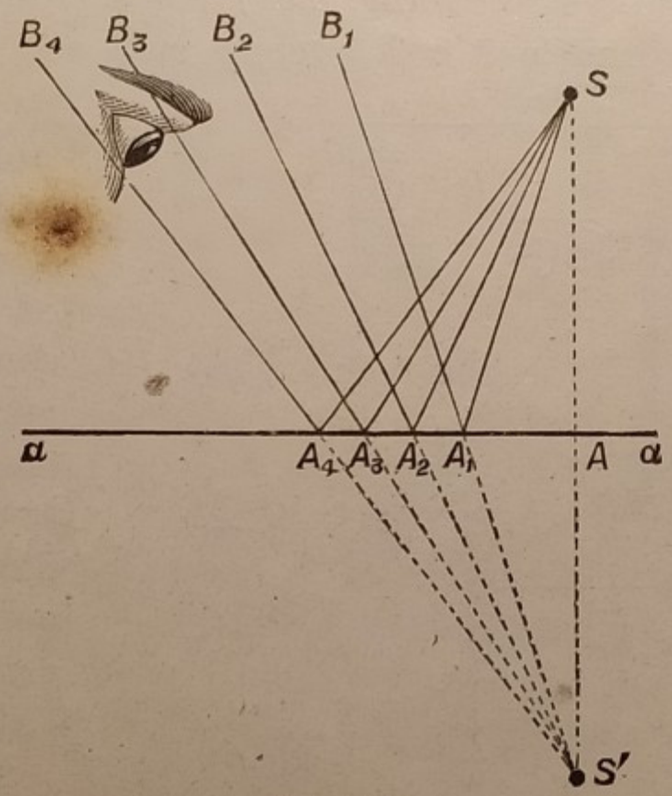


Fig. 262.

facile dimostrare che i prolungamenti dei raggi riflessi s'incontrano dietro lo specchio in un punto S' simmetrico di S rispetto al piano dello specchio.

Per conseguenza un osservatore posto davanti allo specchio riceve nell'occhio un fascio divergente come se provenisse da S', quindi ha l'illusione di vedere in S' un punto luminoso. S' si dice *immagine virtuale* del punto S.

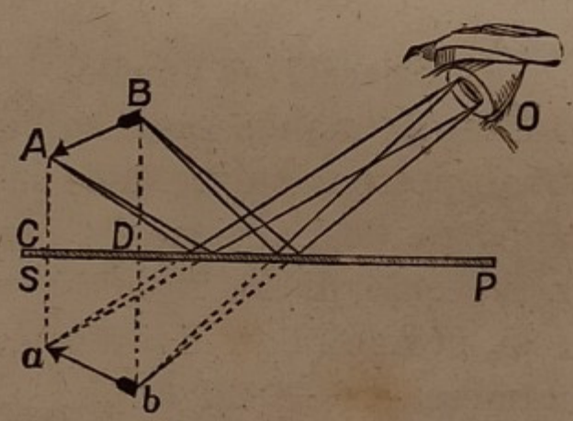


Fig. 263.

Or se davanti a uno specchio piano vien posto un oggetto luminoso, che rappresenteremo per semplicità col segmento a freccia AB (fig. 263) un osservatore ne vedrà l'immagine in ab sotto forma d'una freccia

delle stesse dimensioni, simmetricamente posta rispetto allo specchio.

Per verificare la simmetria di un oggetto e della sua immagine si può fare una curiosa esperienza, detta *esperienza delle due candele*. Da una parte e dall'altra di una lastra comune di vetro *C* (fig. 264) posta verticale, vengono collocate due candele *A* e *B* avendo cura che gli stoppini in particolar modo si trovino simmetricamente posti rispetto alla lastra. Se si accende la candela *A*, una persona che si trovi dalla stessa parte avrà la completa illusione che si accenda anche la candela posta dall'altra parte.

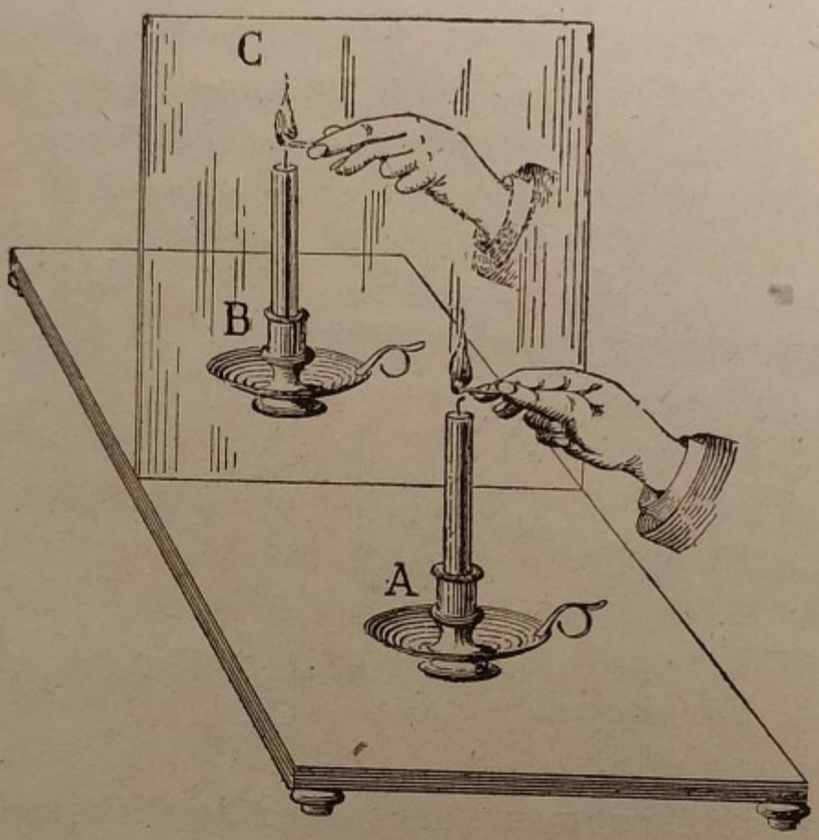


Fig. 264.

Tale curioso, ma semplice fenomeno è largamente sfruttato dagli illusionisti a teatro.

153. Specchi ad angolo. — Un oggetto posto fra due specchi ad angolo manda raggi sull'uno e sull'altro specchio, alcuni dei quali possono subire delle successive riflessioni da uno specchio all'altro. Così avviene che i raggi diversamente riflessi, entrando nell'occhio di un osservatore, oltre le due immagini, diremo così, normali date dai due specchi, ne danno anche altre, il cui numero cresce col diminuire dell'angolo dei due specchi. Ad esempio con due specchi, formanti un angolo di 60°, si hanno 5 immagini.

Il fenomeno è verificato nel *caleidoscopio*, che nella forma più semplice si compone d'un tubo cilindrico di cartone, nel quale sono

fissati due specchi inclinati a 60°, l'intersezione dei quali è parallela all'asse del tubo. Ad una estremità di questo, nello spazio compreso fra due vetri posti perpendicolarmente all'asse, si trovano degli oggetti diversamente colorati, quali frammenti di vetro od altro. Ponendo l'occhio all'altra estremità apparisce un campo circolare brillante, formato da tali oggetti e dalle loro cinque immagini disposte sopra una specie di rosa a sei compartimenti (fig. 265). Facendo girare il tubo, con che si modifica la posizione dei corpi colorati, avvengono delle graziose trasformazioni. Tali apparecchi sono spesso

Fig. 265.

dati ai bambini come giocattolo, ma i disegnatori di stoffe e di carte da parato ne fanno largo uso per ottenere varie combinazioni di disegni e di colori.

Se l'angolo dei due specchi è zero, vale a dire se i due specchi sono paralleli, avviene che un oggetto posto fra essi dà luogo ad una serie indefinita di immagini poste dietro gli stessi, sopra la retta perpendicolare agli specchi che comprende l'oggetto luminoso. Il meccanismo del fenomeno è illustrato nella fig. 266. M e M' sono i due specchi paralleli, S un oggetto posto fra di essi, O l'occhio dell'osservatore. Ad esso arrivano raggi come a e b che hanno subìto una sola riflessione, i quali dànno rispettivamente le immagini S_3 e S_1. I raggi

che come c e d hanno subìto due riflessioni dànno le immagini S_4 ed S_2, e così di seguito.

La luminosità di tali immagini s'indebolisce gradualmente, per effetto della perdita di luce che accompagna ciascuna riflessione.

Se l'oggetto ha un diritto e un rovescio, le immagini successive presentano alternativamente il rovescio e il diritto.

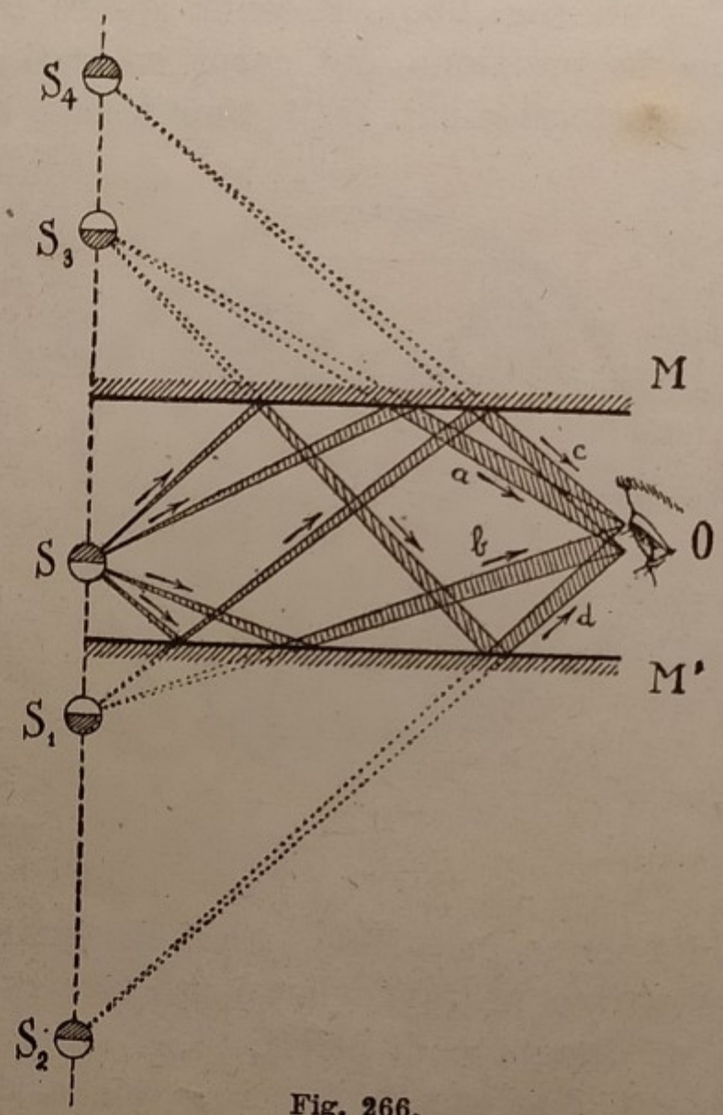


Fig. 266.

Immagini di tal genere si osservano facilmente nelle stanze, sui muri opposti delle quali si trovino delle specchiere; il fenomeno avviene nelle vetrine dei negozi munite lateralmente di specchi paralleli affacciati.

154. Riflessione irregolare o diffusione. — Una superficie non levigata, AB (fig. 267) quale un muro bianco, un foglio di carta comune, una tela bianca tesa sopra un telaio, rimanda

un raggio incidente in tutte le direzioni. Le scabrosità di tali superficie si comportano come piccolissimi specchi piani, orientati nelle più varie maniere, di modo che i raggi incidenti S si riflettono in differenti direzioni. Si ha così il fenomeno della *diffusione*. In qualunque posizione sia l'osservatore, al suo occhio arrivano sempre alcuni di tali raggi, ai quali è dovuta la visibilità dell'oggetto che li diffonde. Uno specchio perfettamente levigato e pulito rimanda i raggi solo nella direzione voluta dalle leggi note, dimodochè un osservatore che si trovi in una camera completamente buia non vede affatto lo specchio, che diventa invece visibile, per effetto della diffusione, quando vi si proietti sopra qualche po' di polvere, o vi si aliti sopra.

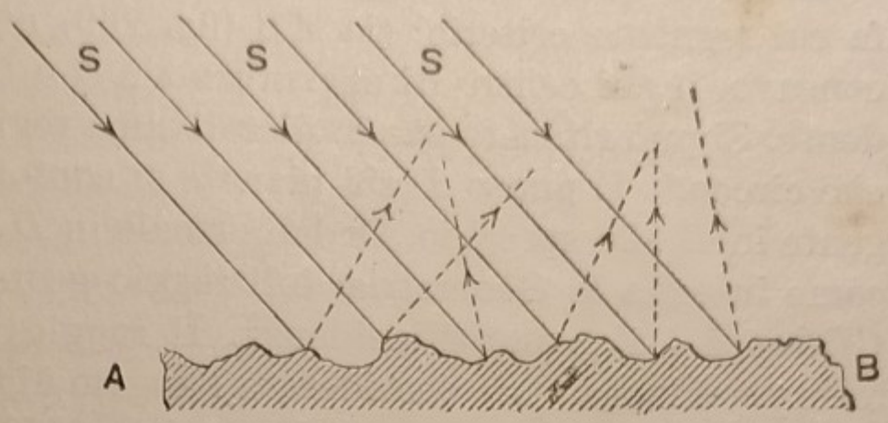


Fig. 267.

155. Specchi sferici. — Uno specchio sferico è una calotta sferica, e secondo che la riflessione avviene sulla superficie concava o su quella convessa, si ha lo specchio sferico *concavo* o *convesso*.

Chiameremo *centro di curvatura* dello specchio il centro O della sfera a cui la calotta appartiene; *vertice* dello specchio il vertice V della calotta; *asse principale* la retta dei punti OV; *raggio di curvatura* il raggio R della sfera a cui lo specchio appartiene (fig. 268).

Nello studio che faremo, uno specchio sferico verrà sempre rappresentato in *sezione principale* o *meridiana*, cioè tale che il piano della figura comprenda l'asse principale; allora lo specchio viene rappresentato da un arco meridiano AB (fig. 269).

L'*apertura* dello specchio è misurata dall'ampiezza dell'arco AB che lo rappresenta.

Asse secondario di uno specchio è qualunque retta che passa per il centro di curvatura.

La costruzione dei raggi riflessi da uno specchio sferico si fa col seguente criterio: sia AB (fig. 269) uno specchio sferico concavo, il cui centro di curvatura sia O e CD un raggio incidente. Si può ritenere che la piccolissima regione dello specchio che circonda il punto D sia piana e si confonda col piano tangente in D allo specchio. Or la normale in D al piano tangente, come insegna la Geometria, è il raggio geometrico OD; sicchè $CDO = i$ è l'angolo d'incidenza. Il raggio riflesso è DE che forma con la normale considerata l'angolo di riflessione $EDO = r$ eguale ad i. Da ciò consegue che ogni raggio incidente che passa per il centro di curvatura, cioè normale allo specchio, si riflette su se stesso.

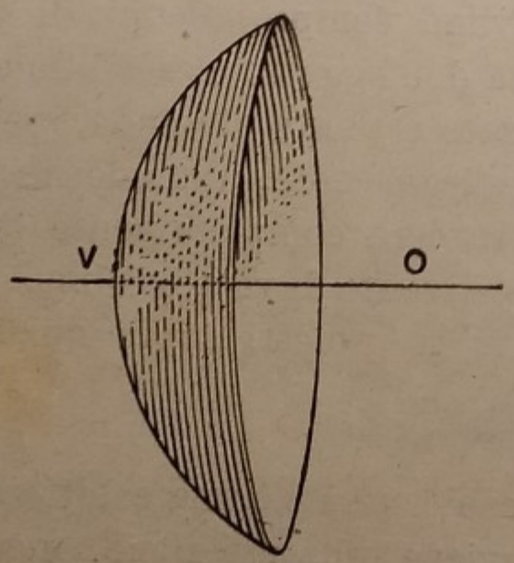


Fig. 268.

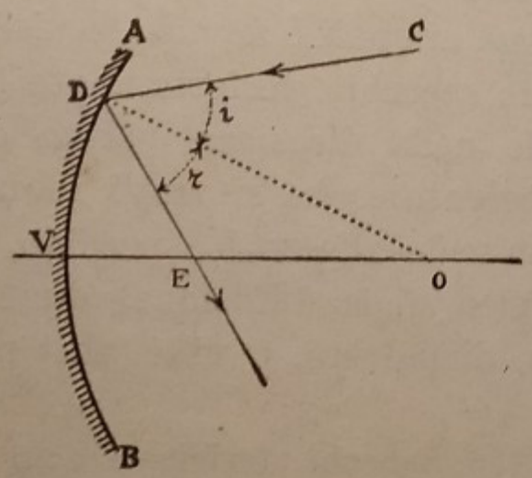


Fig. 269.

156. Specchi sferici concavi. Fuoco principale. — Sia AB (fig. 270) uno specchio sferico concavo e CD un raggio incidente parallelo all'asse principale; il raggio riflesso DE, costruito colla regola or ora esposta, incontra evidentemente l'asse in un punto che indicheremo con F.

Or è dimostrato che se lo specchio ha piccola apertura i raggi riflessi che corrispondono a un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse principale s'incontrano approssimativamente nel detto punto F che sta a metà di VO e che vien detto *fuoco principale* o semplicemente *fuoco* dello specchio.

Inversamente, un fascio di raggi emananti da un punto luminoso posto in F, dopo la riflessione si trasforma in un fascio cilindrico di raggi paralleli all'asse principale. In questa

condizione agiscono approssimativamente i fari delle automobili, i riflettori da marina e militari. Il fascio dei raggi riflessi, essendo cilindrico, ossia di sezione costante, avrebbe la proprietà di illuminare egualmente gli oggetti a qualunque distanza, ma la imperfetta trasparenza dell'aria influisce a diminuirne rapidamente la intensità luminosa. Vedremo però poco più oltre, che in queste applicazioni sono più vantaggiosi altri tipi di specchi.

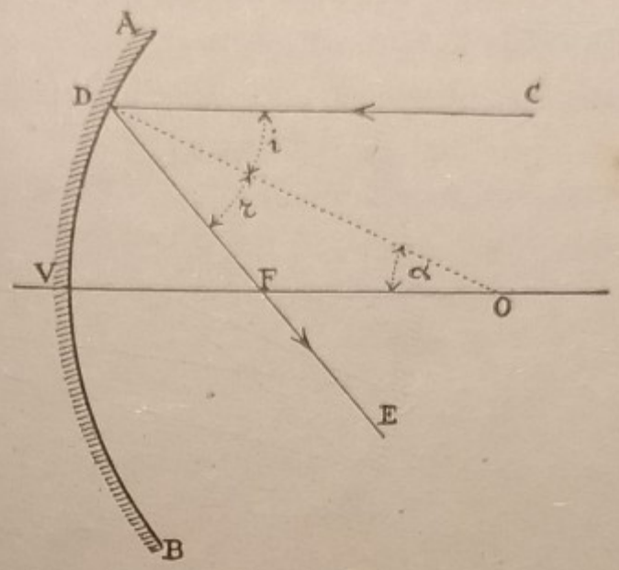


Fig. 270.

Poichè qualunque asse secondario gode otticamente le proprietà dell'asse principale, è evidente che un fascio di raggi incidenti paralleli ad un asse secondario qualsiasi si riflettono in modo da passare sensibilmente per un punto del rispettivo asse secondario, posto ancora a una distanza dal centro di curvatura eguale a metà del raggio di curvatura dello specchio.

157. Specchi ustori. — Dirigendo uno specchio sferico concavo, di dimensioni alquanto grandi, verso il Sole, si osserva che il cono dei raggi riflessi convergenti nel fuoco, riesce facilmente ad accendere un corpo combustibile, quale un pezzo di legno od altro, che vi venga collocato. Secondo la leggenda, Archimede servendosi di grandi specchi concavi, detti *specchi ustori*, avrebbe incendiato le navi romane che assediavano Siracusa.

158. Fuochi coniugati. — La teoria dimostra e l'esperienza conferma che avendo uno specchio sferico concavo di piccola apertura, ad un fascio di raggi luminosi emanati da un punto posto sull'asse principale, corrisponde un fascio di raggi riflessi le cui direzioni s'incontrano anche approssimativamente in uno stesso punto dell'asse detto *immagine* del punto luminoso. Questo e la sua immagine, detti *punti* o *fuochi coniugati*,

hanno distanze dallo specchio legate al raggio di curvatura di questo da una speciale relazione matematica che per semplicità viene omessa.

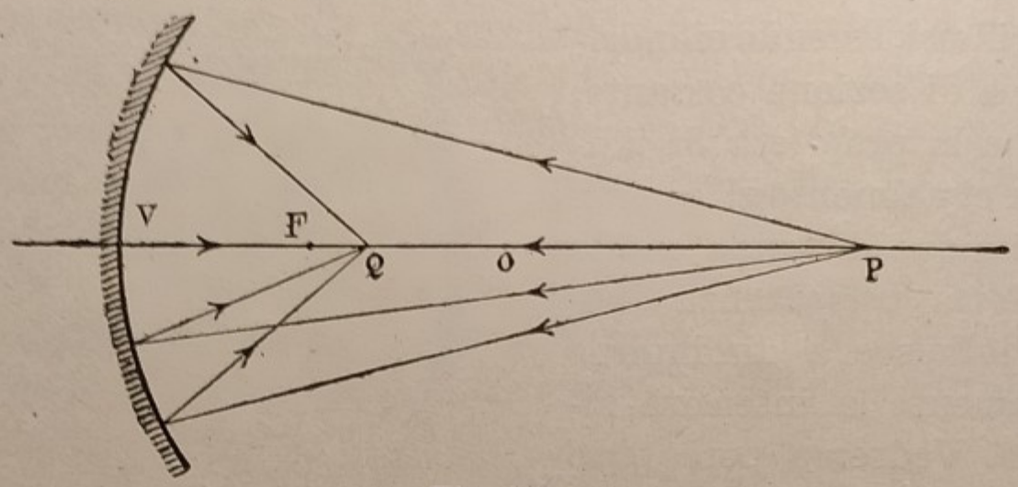


Fig. 271

Da tale relazione risulta che l'immagine è *reale*, vale a dire è il punto dove s'incontrano effettivamente i raggi riflessi, per qualsiasi posizione del punto luminoso compresa tra il fuoco dello specchio e l'infinito (fig. 271). Al contrario l'imma-

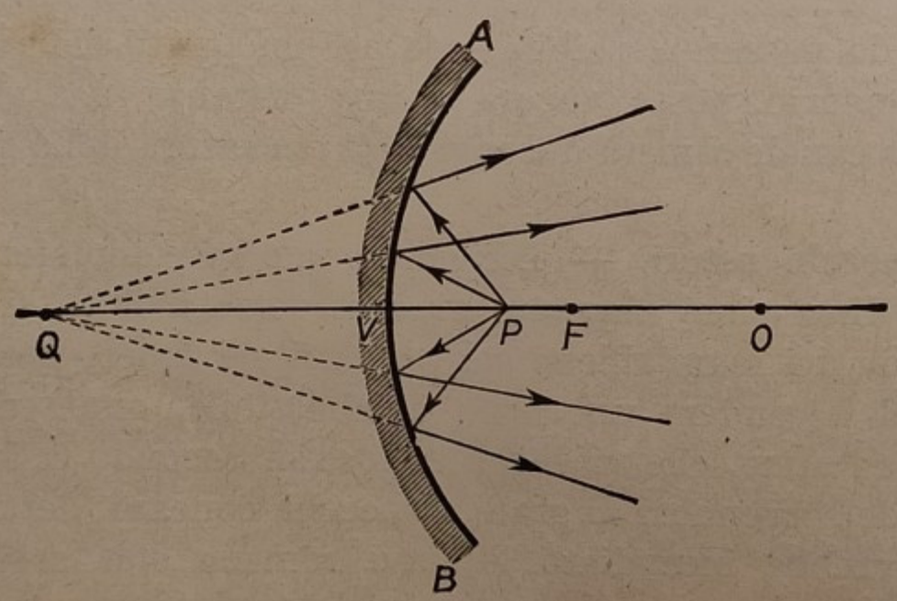


Fig. 272.

gine è *virtuale*, cioè essa è il punto d'incontro dei *prolungamenti* dei raggi riflessi, e si trova quindi dietro lo specchio, quando il punto luminoso è posto fra il fuoco principale e il vertice dello specchio (fig. 272).

Se il punto luminoso non è sull'asse principale, la sua immagine si trova sull'asse secondario passante per il punto luminoso stesso.

159. Immagine di un oggetto. — Un *piccolo* oggetto posto in *vicinanza* dell'asse principale sopra un piano perpendicolare all'asse stesso di uno specchio sferico concavo di piccola apertura, ha la sua immagine sopra il piano *coniugato* del piano comprendente l'oggetto.

Due piani si dicono *coniugati*, se incontrano perpendicolarmente l'asse in due punti coniugati.

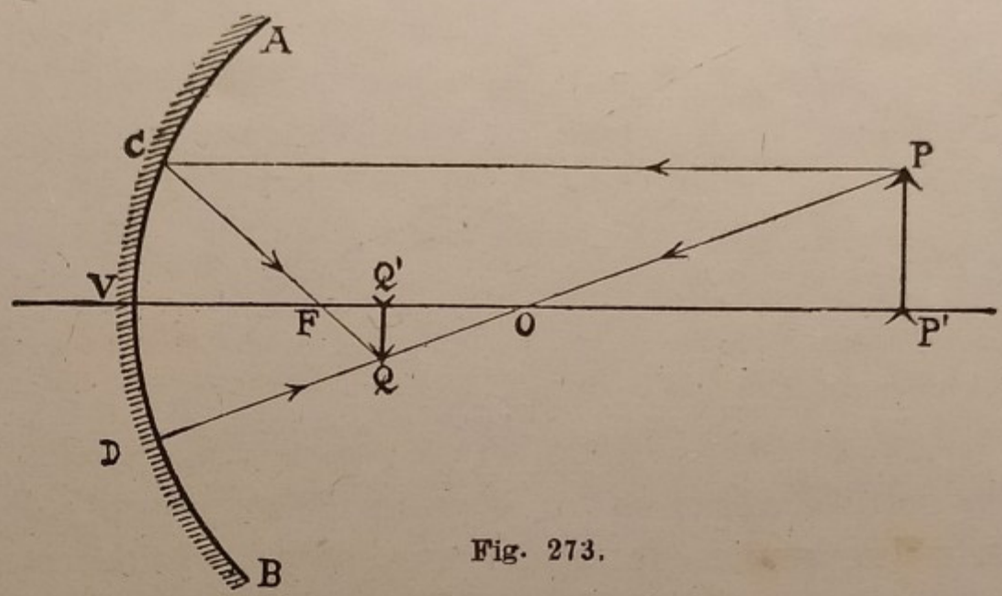


Fig. 273.

Ciò ammesso, la costruzione grafica dell'immagine di un oggetto riesce semplicissima. Sia PP' (figura 273) l'oggetto, rappresentato da una piccola freccia posta perpendicolare all'asse principale di uno specchio AB e con l'estremo P' posto sull'asse stesso.

Si conduce per P il raggio PC parallelo all'asse principale, che si riflette passando per il fuoco F; pure da P si conduce il raggio POD nella direzione dell'asse secondario di P, che si riflette su se stesso. I due raggi riflessi s'incontrano in questo caso effettivamente in Q, che è perciò l'immagine di P; e per quanto è stato poco sopra esposto il segmento QQ', perpendicolare all'asse con l'estremo Q' sull'asse, è l'immagine dell'oggetto.

Si ha così un'immagine *reale*, *capovolta* e più *piccola* dell'oggetto, posta fra il fuoco principale e il centro di curvatura. Tale risultato si ha sempre per tutte le posizioni dell'oggetto comprese fra l'infinito e il centro di curvatura, e l'immagine è tanto più piccola e più vicina al fuoco quanto più lontano dallo specchio si trovi l'oggetto.

Se l'oggetto si avvicina al centro di curvatura, anche la immagine procede dal fuoco verso lo stesso punto, di guisa che quando l'oggetto si trova su di un piano passante per il centro di curvatura e perpendicolare all'asse, anche l'immagine, reale, capovolta, si trova sullo stesso piano ed ha le dimensioni dell'oggetto.

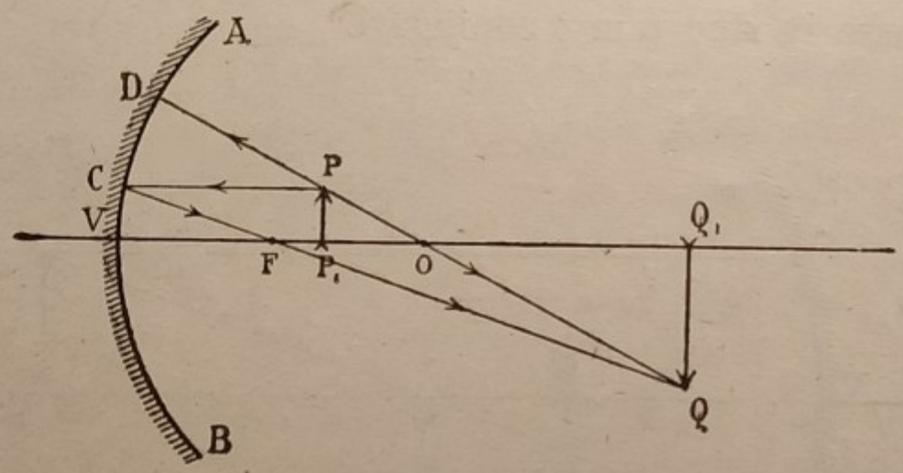


Fig. 274.

Se l'oggetto *è compreso tra il centro di curvatura e il fuoco*, la costruzione grafica fatta coi precedenti criteri, ci mostra un'immagine *reale, capovolta, più grande, posta fra il centro di curvatura e l'infinito* (figura 274).

Infine se l'oggetto si trova compreso fra il fuoco e lo specchio (figura 275), l'immagine apparisce *virtuale, diritta, più grande*, posta dietro lo specchio.

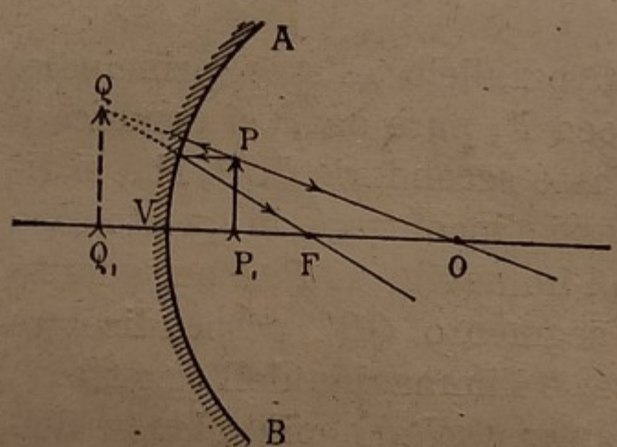


Fig. 275.

160. Verifiche sperimentali. — In una camera oscura si colloca davanti ad uno specchio sferico concavo una candela accesa, in modo che la fiammella giaccia presso a poco sull'asse principale.

Quando la fiamma si trova al di là del centro di curvatura è facile raccogliere la sua immagine reale, più piccola e capovolta sopra un piccolo schermo bianco collocato in posizione adatta fra il fuoco e il centro di curvatura (figura 276).

Avvicinando la candela allo specchio, l'immagine si allontana e si ingrandisce: quando la candela è nel centro di curvatura, l'immagine è pure nella stessa posizione, grande quanto l'oggetto e capovolta.

Se si mette la candela fra il centro di curvatura e il

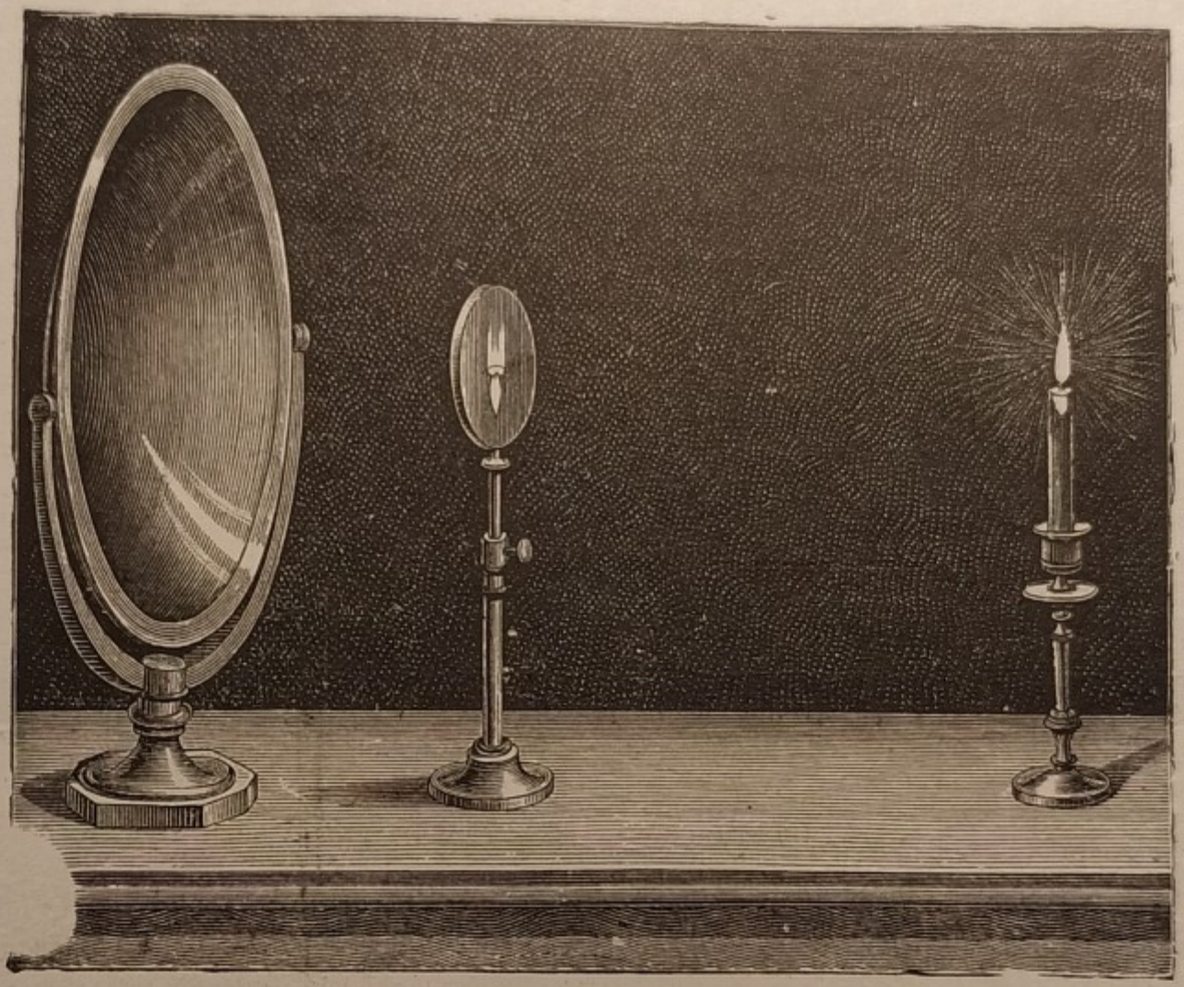


Fig. 276.

fuoco, l'immagine rovesciata reale, più grande, si produce al di là del centro (fig. 277) e quando la candela è nel fuoco, l'immagine è infinitamente grande e posta all'infinito.

Ponendo infine la candela fra il fuoco e lo specchio non è possibile raccogliere l'immagine sopra uno schermo, ma ponendo l'occhio davanti allo specchio sul cammino dei raggi riflessi, apparisce, dietro lo specchio, un'immagine virtuale, diritta e più grande della fiamma.

Una persona che si ponga vicino ad uno specchio sferico concavo, vede um'immagine virtuale e ingrandita della sua faccia (fig. 278).

161. Specchi sferici convessi. Fuoco. Immagini. — Seguendo un ragionamento analogo a quello usato per gli specchi con-

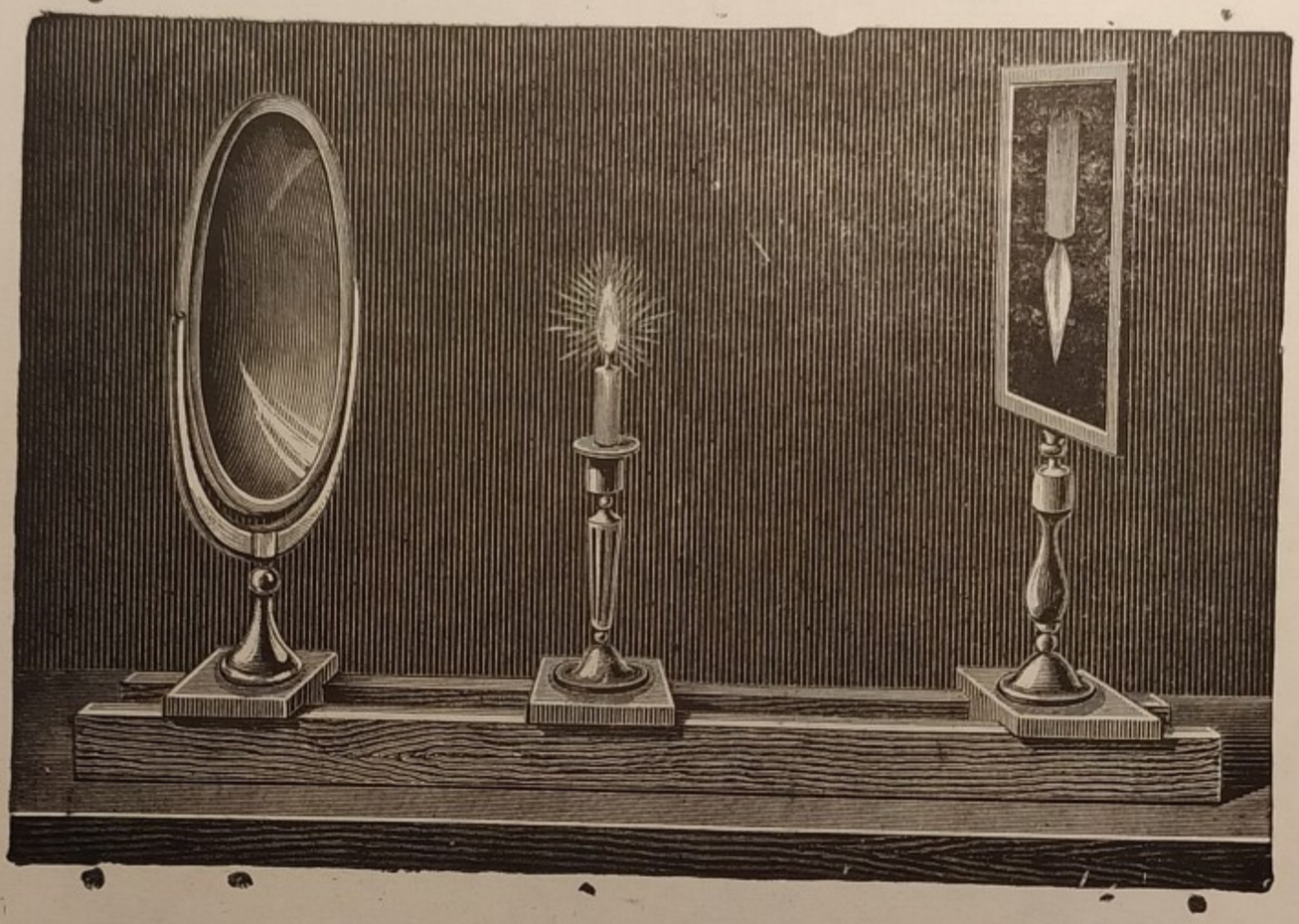


Fig. 277.

cavi, si viene alla conclusione che un fascio di raggi, *paralleli* all'asse principale, incidenti sopra uno specchio sferico

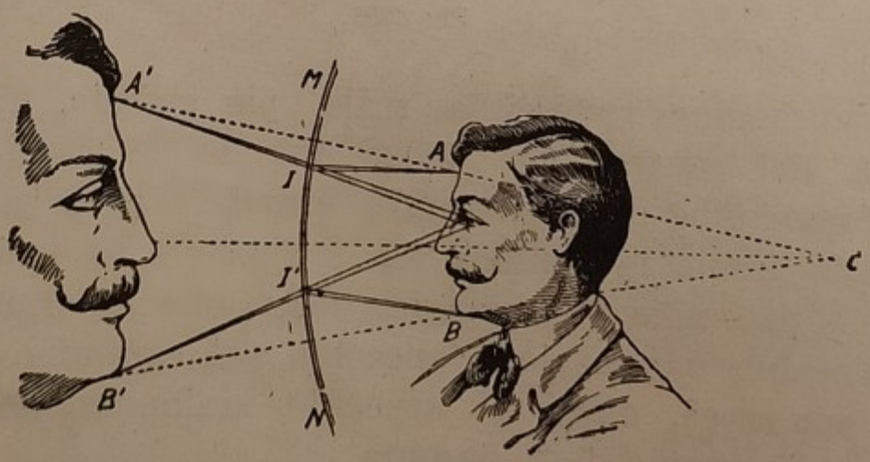


Fig. 278.

convesso di piccola apertura, viene riflesso formando un fascio, *divergente*, in modo che i prolungamenti dei raggi s'incon-

trano, dietro lo specchio, sensibilmente in un punto F, posto ancora a metà di OV e che si chiama *fuoco principale* (fig. 279). Questo fuoco evidentemente è *virtuale*, e se

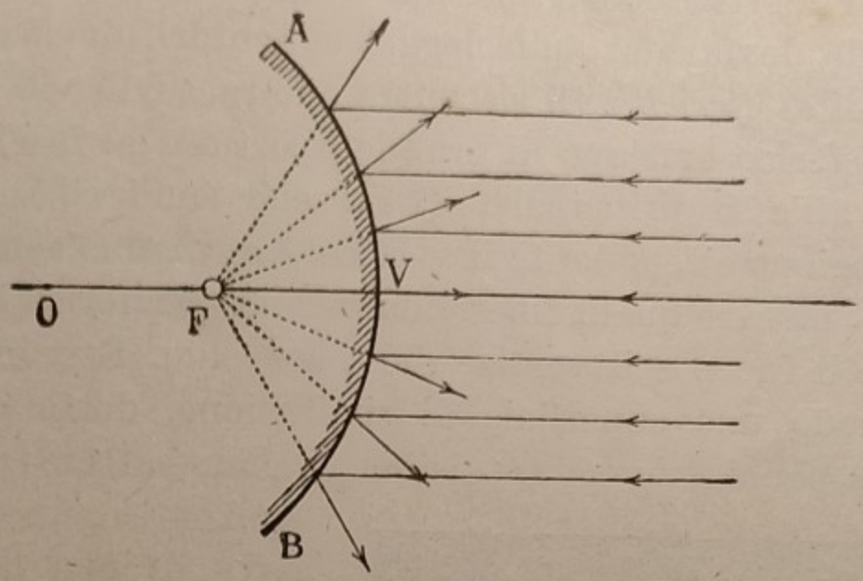


Fig. 279.

ne può avere una prova dirigendo l'asse di uno specchio convesso verso il Sole; si osserva un'immagine molto brillante che apparisce dietro lo specchio, e che non è possibile raccogliere sopra uno schermo.

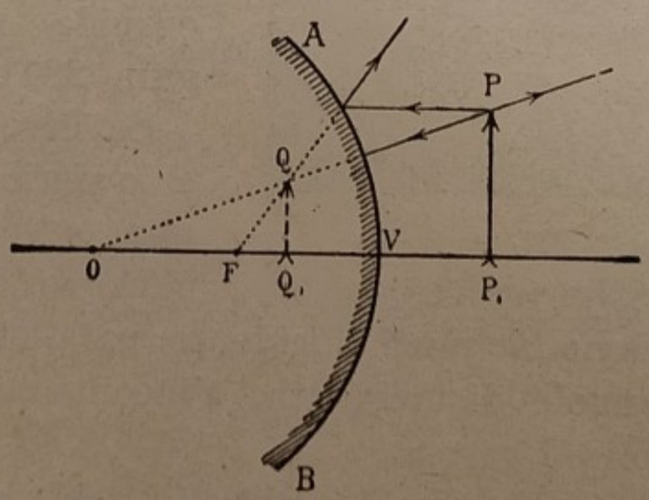


Fig. 280.

Gli specchi sferici convessi danno solo immagini *virtuali* degli oggetti, immagini *più piccole*, *diritte* e *poste fra il fuoco principale e lo specchio*, come risulta dalla figura 280 nella quale la costruzione dell'immagine QQ_1 dell'oggetto PP_1 è fatta con la regola seguita negli specchi concavi.

162. Aberrazioni di sfericità. - Specchi parabolici. — Le regole sopra esposte valgono solo in via approssimativa e i risultati a cui portano si allontanano dalla realtà quanto più grande è l'apertura degli specchi. Nella realtà infatti si riscontrano delle deviazioni dalle leggi elementari, deviazioni dette *aberrazioni di sfericità*. Si riscontra che raccogliendo sopra uno specchio sferico concavo di grande apertura un fascio di raggi paralleli all'asse principale, quelli che sono riflessi da una piccola regione circondante il vertice, concorrono sensibilmente nel fuoco, mentre quelli riflessi dalla zona periferica incontrano l'asse tra il fuoco e il vertice dello specchio. Essi inviluppano in tal modo una superficie di rivoluzione, detta *caustica di riflessione*, che si può rendere visibile facendo battere i raggi solari contro la superficie concava di una lamina metallica lucida piegata ad arco di cerchio; sul piano, sul quale la lamina appoggia, si vede disegnarsi una curva luminosa a due rami col cuspide nel fuoco (figura 281).

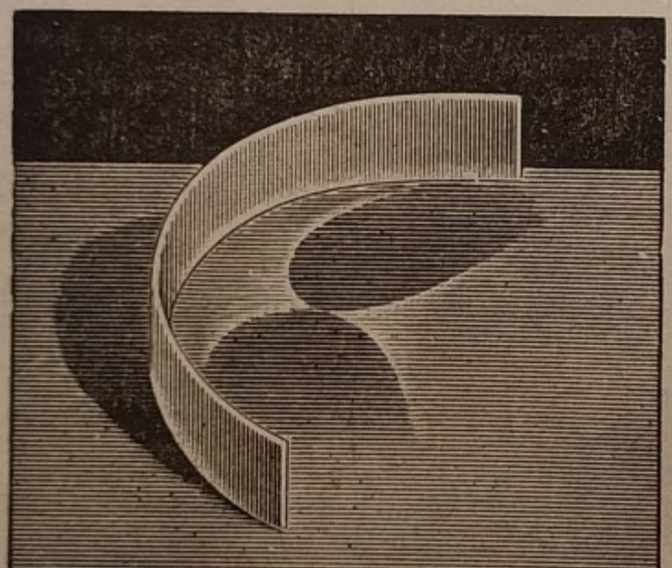


Fig. 281.

Se invece di uno specchio sferico concavo si usa uno specchio *parabolico* concavo, i raggi riflessi, che corrispondono a raggi incidenti paralleli all'asse, qualunque sia l'angolo di incidenza, s'incontrano rigorosamente tutti nel fuoco.

Per tal ragione gli specchi parabolici sono largamente usati nei riflettori militari, nei fari ed anche nei comuni fanali delle automobili, con maggiore efficacia degli specchi sferici concavi. Ma anche usando specchi parabolici resta sempre l'inconveniente dell'assorbimento della luce dovuto all'atmosfera, assorbimento che è tutt'altro che trascurabile, specialmente nei bassi strati atmosferici ricchi di umidità e di pulviscolo.

Rifrazione della luce.

163. Rifrazione e sue leggi. — Dicevamo che la luce si propaga in linea retta, però alla condizione che il mezzo di propagazione sia trasparente, omogeneo e indefinito. La luce può benissimo, come si vedrà a suo tempo, procedere anche secondo una curva, se il mezzo non è omogeneo, e può anche cambiare bruscamente direzione passando da un mezzo ad un altro in qualche modo diverso dal primo.

Consideriamo il caso semplicissimo di un raggio di luce SI (fig. 282), che provenendo dall'aria incontri obliquamente la superficie MM' d'una vasca d'acqua. Il raggio penetra nell'acqua e vi procede in linea retta, però secondo una direzione IR diversa da quella del raggio incidente SI. Il raggio, per così dire, si spezza nel punto d'incidenza I, e il fenomeno vien detto *rifrazione*.

Nel caso specifico riferito il raggio *rifratto* IR si accosta alla normale, formando cioè colla normale NN condotta per il punto d'incidenza alla superficie di separazione fra i due mezzi, un *angolo di rifrazione* $RIN = r$, minore dell'*angolo d'incidenza* $SIN = i$.

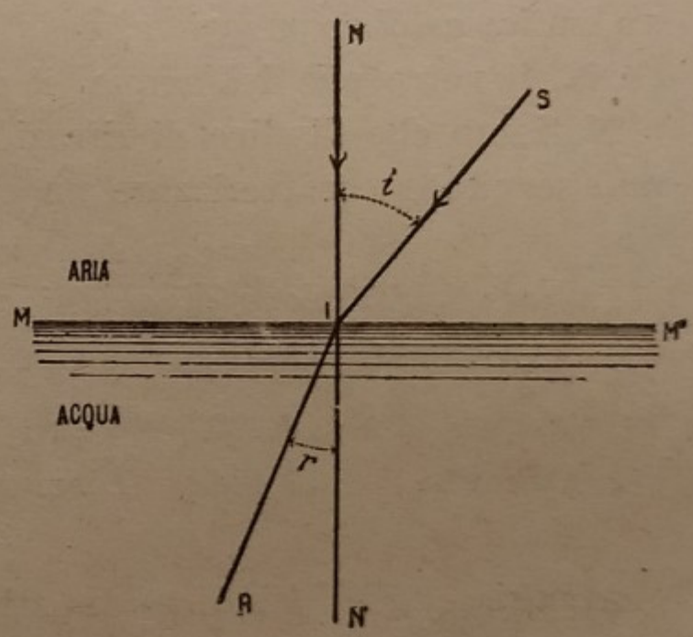


Fig. 282.

La rifrazione della luce obbedisce alle seguenti *leggi di Cartesio*:

1° *Il raggio rifratto è sullo stesso piano individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di separazione nel punto d'incidenza.*

2° *Per due dati mezzi e per un dato colore di luce, qualunque sia l'angolo d'incidenza, il rapporto fra il seno dell'angolo d'incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante.*

Indicando con i ed r rispettivamente i due angoli, avremo quindi

$$\frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = n \,. \qquad (1)$$

164. Indice di rifrazione. — Il numero n definito dalla precedente relazione vien detto *indice di rifrazione relativo* ai due mezzi considerati, per quel dato colore di luce o anche *indice di rifrazione del 2° mezzo*, cioè quello in cui si trova l'angolo r, *rispetto al 1°*.

Si chiama invece *indice assoluto* di rifrazione di una sostanza l'indice di quella sostanza rispetto al vuoto.

L'indice assoluto dell'aria è prossimo all'unità: è 1,000292 a 0° e alla pressione di 76 cm. di mercurio; lo stesso è per gli altri gas nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione. Sicchè l'indice assoluto di un corpo è molto approssimativamente eguale al suo indice relativo all'aria.

Or di due mezzi chiameremo *più rifrangente* quello che ha un *indice assoluto maggiore*; così l'acqua è più rifrangente dell'aria, il vetro più dell'acqua, il diamante più del vetro.

Notiamo che l'indice di rifrazione è una costante fisica che può servire a caratterizzare un corpo.

Indici di rifrazione di alcuni corpi:

Alcool etilico	1,361	Solfuro di carbonio	1,629
Acqua	1,333	Vetro	1,5 circa
Glicerina	1,474	Diamante	2,417.

Apparisce che l'indice di rifrazione non cresce sempre colla densità; l'alcool meno denso dell'acqua è più rifrangente di questa.

Crediamo ancora cosa opportuna stabilire una convenzione relativa alla formola (1), cioè che, indipendentemente dal senso del cammino della luce, converremo di indicare sempre con i l'angolo maggiore, cioè quello che si trova nel mezzo meno

rifrangente, dimodochè il rapporto n fra i seni dei due angoli è sempre un numero maggiore di 1.

La formola stessa ci permette di risolvere facilmente qualche caso speciale. Supponiamo in primo luogo che sia $i = 0$, cioè che il raggio incidente cada normale sulla superficie di separazione; se $i = 0$ anche sen $i = 0$ e quindi la formola (1) si trasforma in quest'altra

$$\frac{0}{\text{sen}\, r} = n \qquad (1)$$

ossia

$$0 = n \,\text{sen}\, r\,.$$

Questa relazione è soddisfatta solo per sen$r = 0$, l'indice n avendo sempre un valore non nullo. Perciò se sen$r = 0$ è anche $r = 0$. Quindi quando un raggio colpisce normalmente la superficie di separazione di due mezzi procede senza mutar direzione essendo normale alla superficie anche il raggio rifratto.

Infine si noti che se la luce proviene dall'aria (fig. 282) è SI il raggio incidente e IR quello rifratto e rispettivamente i ed r sono gli angoli di incidenza e di rifrazione. Se invece la luce proviene dall'acqua essendo RI il raggio incidente è IS il raggio rifratto e in questo caso r è l'angolo d'incidenza ed i quello di rifrazione. I raggi incidente e rifratto sono *reversibili*, in questo fatto si compendia la *legge di reciprocità* della rifrazione.

165. Angolo limite - Riflessione totale. — Supponiamo ora che la luce passi da un mezzo meno rifrangente ad uno più rifrangente, per esempio dall'aria all'acqua, e sia AO un raggio incidente normale, e BO, CO... EO (fig. 283) altri raggi con angoli di incidenza via via crescenti. Al raggio normale AO corrisponde, come s'è già detto, il raggio rifratto OA, pure normale e agli altri raggi incidenti corrispondono rispettivamente i raggi rifratti OB_1, OC_1 ... OE_1 con angoli di rifrazione *minori* dei rispettivi angoli di incidenza. Se dunque un raggio incidente, come EO, forma un angolo d'incidenza di 90° il rispettivo raggio rifratto OE_1 formerà un angolo di rifrazione *minore* di 90°, ma sarà questo il massimo angolo di rifrazione possibile. Questo angolo è detto *angolo limite*. *L'angolo limite è dunque l'angolo*

di rifrazione che compete a un angolo d'incidenza di 90°, sempre inteso che la luce passi da un mezzo meno a uno più rifrangente. L'angolo limite per l'acqua è di 48°.35′; per il vetro di 42°.

Consideriamo adesso il passaggio della luce da un mezzo più a uno meno rifrangente, per esempio dall'acqua all'aria.

Per la legge di reciprocità ai raggi che vanno dall'acqua verso l'aria A_1O, B_1O, C_1O ..... E_1O (fig. 283) corrispondono i

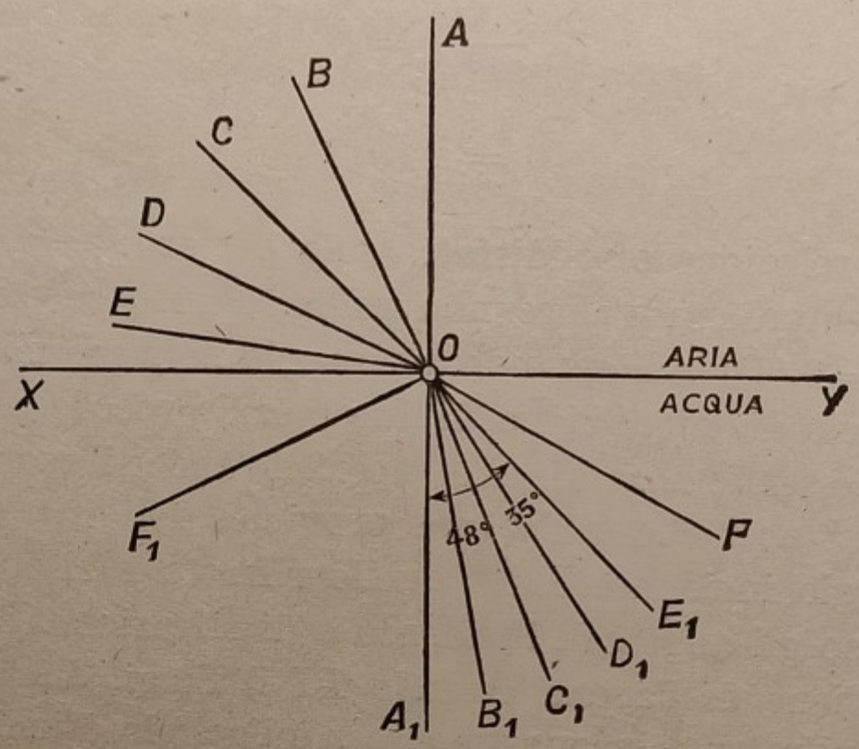


Fig. 283.

raggi rifratti OA, OB, OC, ... OE. Dunque il raggio incidente E_1O che forma un angolo d'incidenza eguale all'angolo limite, uscirà nel mezzo meno rifrangente secondo OE, cioè radente alla superficie di separazione. Sicchè nel mezzo meno rifrangente possono passare solo i raggi i cui angoli di incidenza non superano l'angolo limite. Un raggio come FO che, venendo dal mezzo più rifrangente, forma un angolo d'incidenza superiore all'angolo limite, resta nel mezzo donde proviene e si riflette secondo OF_1 seguendo le leggi della riflessione speculare. Il fenomeno è detto *riflessione totale*.

Concludendo: *la luce può sempre passare da un mezzo meno rifrangente a uno più rifrangente qualunque valore abbia l'angolo di incidenza; inversamente, possono passare solo i raggi i cui angoli d'incidenza non superino l'angolo limite.*

166. Prismi a riflessione totale. — Di solito si usa un prisma triangolare, rettangolo, isoscele, rappresentato nella figura 284 in sezione normale. Un raggio luminoso *DE* che incontra la faccia cateto *AB* normalmente penetra nel prisma senza deviare e arriva nel punto *F* sulla faccia ipotenusa. Quivi forma un angolo d'incidenza di 45°, che è superiore all'angolo

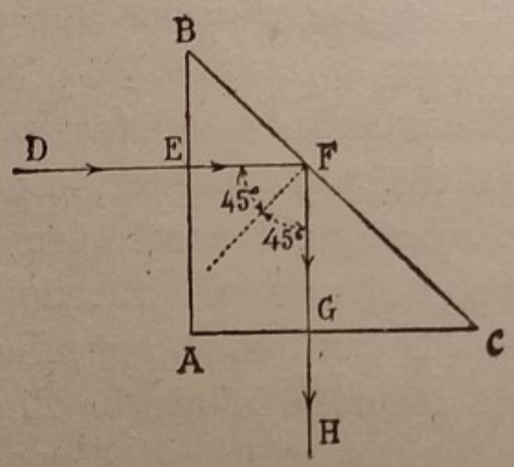


Fig. 284.

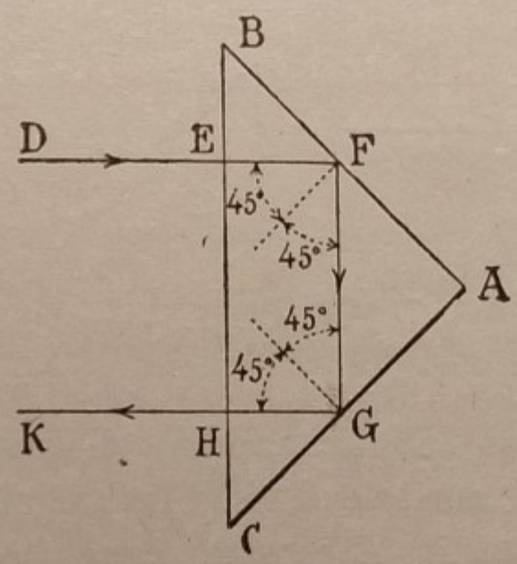


Fig. 285.

limite del vetro che è 42°, sicchè si riflette totalmente in *F* econdo *FG*, incontra in *G* la faccia cateto *AC* normalmente ed sce dritto senza deviare secondo *GH*.

In altre circostanze si utilizza il fenomeno com'è illustrato dalla figura 285. *ABC* è ancora un prisma rettangolo e isoscele: il raggio incidente *DE*, normale all'ipotenusa, senza deviare arriva entro il prisma in *F*, quivi si riflette totalmente secondo *FG*; in *G* subisce una seconda riflessione totale ed esce dal prisma senza deviare nella direzione *GHK*; questo raggio emergente dal prisma è parallelo al raggio incidente *DE*, ma cammina in senso inverso.

In molti strumenti ottici i prismi a riflessione totale fanno un servizio importantissimo.

Oltre a ciò dei prismi a riflessione totale sono anche usati nei periscopi dei sottomarini.

167. Lastra e prisma. — S'intende per lastra un corpo trasparente limitato *da due faccie piane parallele*; son tali, ad esempio, i vetri delle comuni finestre.

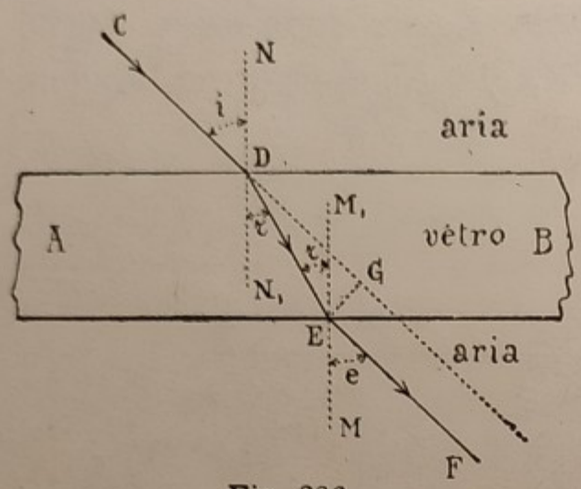


Fig. 286

Un raggio di luce che cade normalmente su una lastra la attraversa senza deviare e senza subire alcun spostamento.

Un raggio che cade sulla lastra obliquamente, la attraversa *senza deviazione*, ma *con spostamento* laterale.

Sia infatti AB una lastra (figura 286) e CD un raggio incidente obliquo. Il raggio penetra nella lastra e vi procede secondo DE formando colla normale NN_1 un angolo r minore di i, ma tale da soddisfare alla nota formola. L'angolo d'incidenza in E essendo eguale ad r e quindi *minore* dell'angolo limite, il raggio esce secondo EF, formando un angolo e, detto angolo *di emergenza*, eguale ad i, e ciò per il principio della reversibilità (164).

In conclusione, il raggio *emergente* EF risulta parallelo al raggio incidente, ma spostato di una quantità EG, la quale si dimostra che è proporzionale allo spessore della lastra e cresce col crescere di i, ma è sempre inferiore allo spessore della lastra. Per lastre sottili quali sono i vetri delle finestre gli oggetti guardati attraverso subiscono uno spostamento laterale trascurabile.

È detto *prisma* un corpo trasparente limitato da *due faccie piane non parallele.*

Sia ABC la sezione retta di un prisma di vetro (fig. 287) sopra la faccia AB del quale cade un raggio di luce DE. Il raggio penetra nel prisma, secondo EF, formando con la normale MN un angolo r legato ad i dalla relazione fondamentale. Giunto in F, ammesso che l'angolo d'incidenza r' sia inferiore

all'angolo limite, il raggio emerge secondo FG, formando colla normale PN un angolo di *emergenza* i' legato ad r' dalla stessa relazione fondamentale.

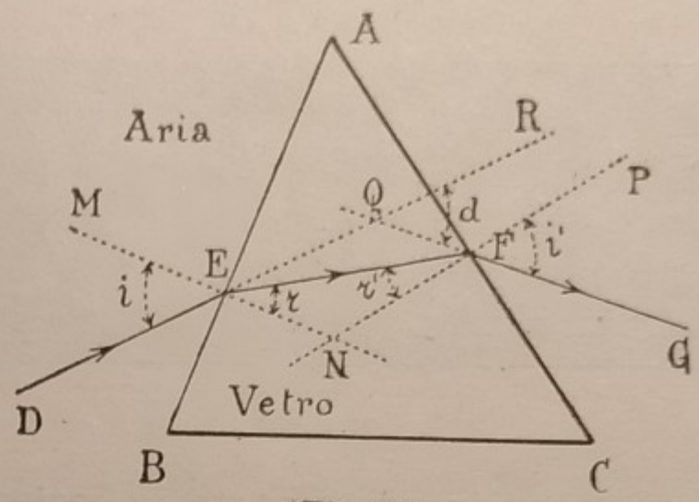


Fig. 287.

Avvengono così due rifrazioni, una all'entrata e l'altra all'uscita, ciascuna delle quali ha per effetto di deviare il raggio verso la *base ottica* del prisma. È detta base ottica la faccia BC — che potrebbe anche mancare — opposta all'angolo *rifrangente* del prisma, cioè all'angolo delle due faccie AB, AC attraversate dal raggio.

La somma delle due deviazioni è misurata dall'angolo $d = RQG$ formato dalle direzioni DE e FG dei raggi incidente ed emergente, detto *deviazione prismatica*. Esso è tanto maggiore quanto più grande è l'angolo $\widehat{A}$ formato dalle due faccie del prisma e quanto maggiore è l'indice di rifrazione della sostanza di cui è fatto il prisma; inoltre varia al variare dell'angolo di incidenza.

168. Lenti. — Si dice lente un corpo trasparente, quasi sempre di vetro, limitato da due faccie, una delle quali almeno è curva. Per semplicità noi studieremo solo le lenti *sferiche*, cioè le lenti nelle quali le faccie curve sono calotte sferiche.

Combinando in tutti i modi possibili due calotte sferiche o una calotta sferica e un piano, si possono avere sei forme di lenti (fig. 288): 1ª *biconvessa*; 2ª *piano-convessa*; 3ª *convesso-concava*; 4ª *biconcava*; 5ª *piano-concava*; 6ª *concavo-convessa*.

Le forme 1ª, 2ª, 3ª *più spesse nel mezzo*, costituiscono le lenti *convergenti*; le 4ª, 5ª, 6ª, *più sottili nel mezzo*, le lenti *divergenti*. Le lenti 3ª e 6ª si chiamano anche rispettivamente *menisco convergente* e *menisco divergente*.

Si chiama *asse principale* di una lente la retta che passa per i centri di curvatura delle due faccie sferiche; e quando una faccia è piana, l'asse principale è la retta che condotta per il centro di curvatura della faccia sferica, incontra perpendicolarmente la faccia piana.

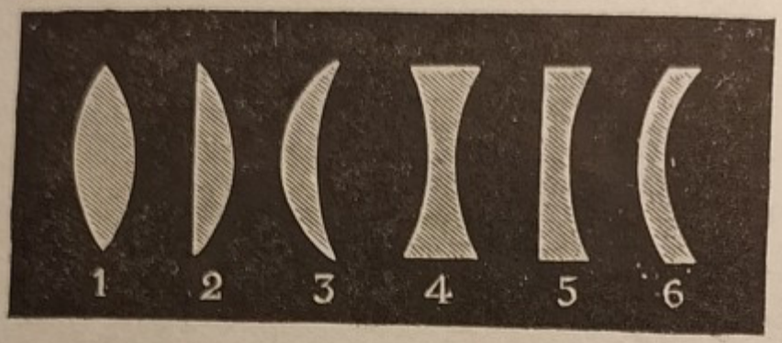


Fig. 288.

Nella precedente figura le lenti sono evidentemente rappresentate in sezione meridiana, o principale, cioè in sezione con un piano passante per l'asse principale.

Nel seguito prenderemo in considerazione soltanto le lenti con *piccola apertura*, vale a dire tali che gli archi meridiani, che rappresentano le faccie curve, abbiano piccola ampiezza e ci ridurremo anche al caso di lenti *molto sottili*, per cui non dovremo occuparci del cammino dei raggi dentro il loro spessore.

169. Rifrazione di un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse principale. Fuochi. — L'esperienza e il calcolo dimostrano chiaramente che se sopra una lente convergente si fanno cadere dei raggi paralleli all'asse principale, all'uscita tali raggi si mostrano *convergenti* sensibilmente in un punto F dell'asse, che vien detto *fuoco principale* della lente (fig. 289). La distanza di tal punto dalla lente vien detta *distanza focale principale*.

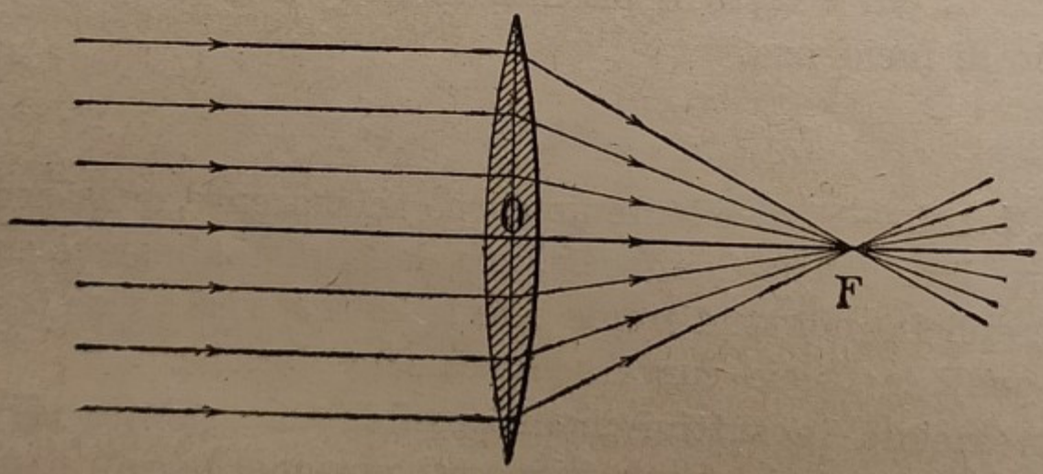


Fig. 289.

Per ottenere *approssimativamente* la distanza focale di una lente convergente, si pone davanti ad essa, a una grande distanza, una candela, e si sposta dall'altra parte della lente uno schermo finchè si ottenga su di esso, netta la piccola immagine reale capovolta che la lente vi produce.

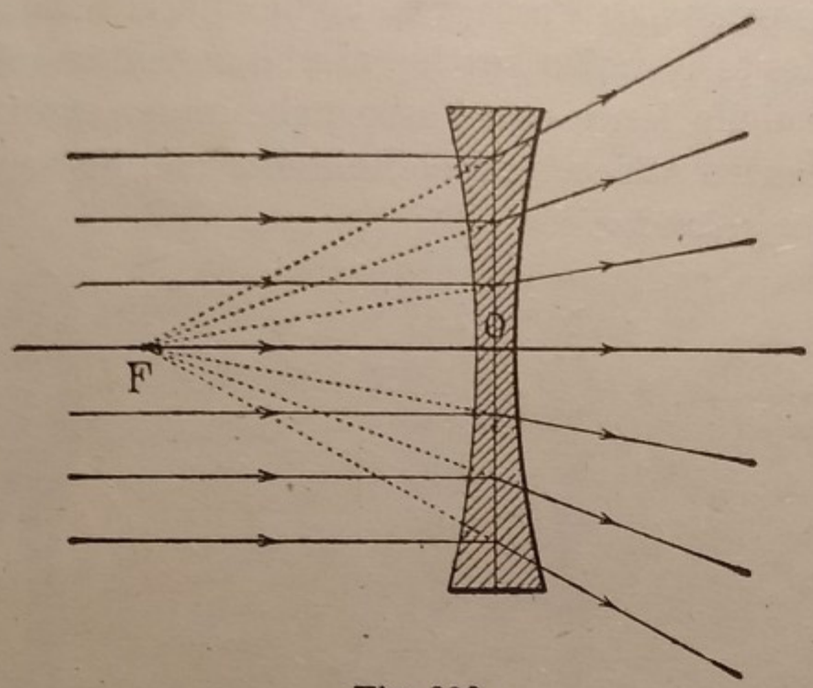


Fig. 290.

Si ripete poi la stessa operazione rovesciando la lente e si prende come distanza focale la media dei due risultati.

Siccome i raggi paralleli possono cadere sull'una o sull'altra faccia, la lente ha *due fuochi principali*; essi sono *reali* posti da una parte e dall'altra alla stessa distanza dalla lente.

Per essere chiari chiameremo *primo* fuoco quello che sta dalla parte donde viene la luce, e *secondo* fuoco l'altro. Reciprocamente, se si pone un punto luminoso in uno dei fuochi principali, i raggi che cadono sulla lente, emergono dalla parte opposta sensibilmente paralleli all'asse principale.

Se la lente è divergente (fig. 290), a un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse principale corrisponde un fascio di raggi emergenti *divergenti*, tali che prolungati incontrano sensibilmente l'asse in un punto *F* che sta dalla parte donde vengono i raggi; e che si dice anche *fuoco principale*. Esso è però *virtuale*.

170. Immagini prodotte dalle lenti convergenti. — L'esperienza dimostra che un raggio luminoso qualunque, sia o no parallelo all'asse principale, attraversa una lente quasi sempre deviando. Alcuni raggi però non subiscono deviazione e fra questi quello che coincide con l'asse principale. I raggi che attraversando una lente non subiscono deviazione passano tutti per un punto dell'asse principale detto *centro ottico*, il quale, se la lente è molto sottile, si può considerare posto sull'intersezione della lente con l'asse principale. Ogni retta passante per il centro ottico, non coincidente con l'asse principale, si chiama *asse secondario*.

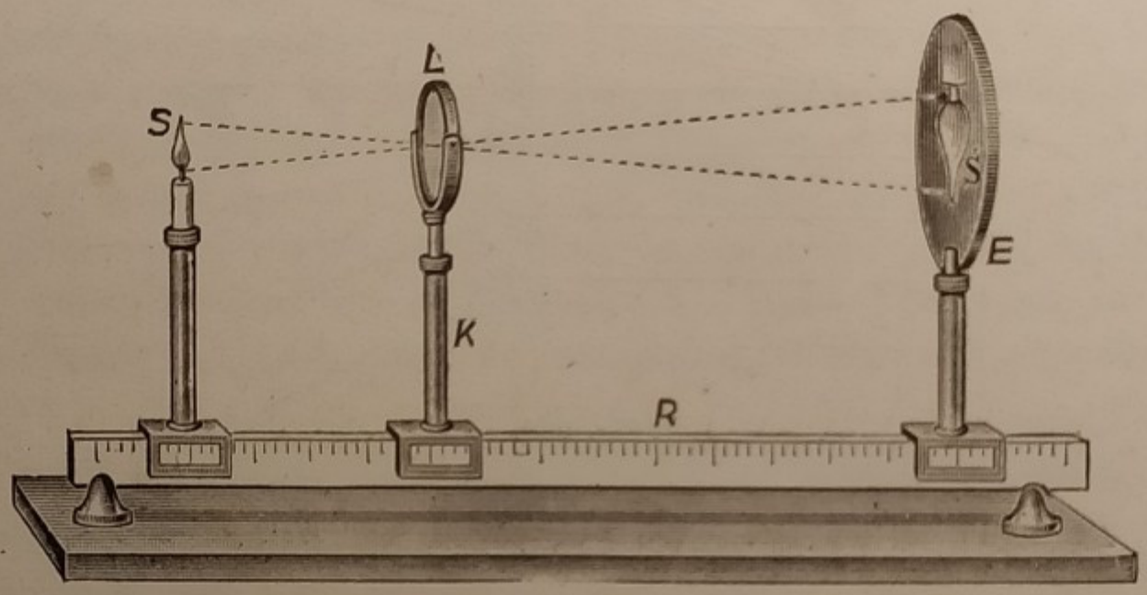


Fig. 291.

La teoria matematica delle lenti e l'esperienza provano che i raggi emessi da un punto luminoso, posto davanti ad una lente, la attraversano deviando in modo che le loro direzioni concorrono approssimativamente in uno stesso punto che vien detto *immagine* del punto luminoso stesso. Per conseguenza dato un oggetto luminoso di una certa estensione, ai suoi diversi punti corrisponderanno altrettanti punti immagine, il complesso dei quali è l'immagine dell'oggetto. Per provarlo si metta una candela S davanti a una lente convergente L (fig. 291) a una distanza dalla lente superiore alla distanza focale e dall'altra parte uno schermo E. Spostando questo convenientemente si troverà una posizione per la quale vi si disegnerà sopra netta l'immagine rovesciata S' della fiammella. Se si sposta la candela dovremo anche spostare lo schermo per riceverne l'immagine.

Tenendo presente come si rifrangono i raggi incidenti paralleli all'asse principale e quelli che passano per il centro ottico, è possibile costruire l'immagine di un oggetto prodotta da una lente convergente, quando sia nota la posizione dei suoi fuochi e del centro ottico. Si abbia infatti una lente convergente sottile (fig. 292) coi fuochi in F_1 e F_2 e il centro ottico in O, e dinanzi ad essa sia posto un oggetto PP'. Il raggio incidente parallelo all'asse PA, si rifrange secondo AF_2, per quanto è

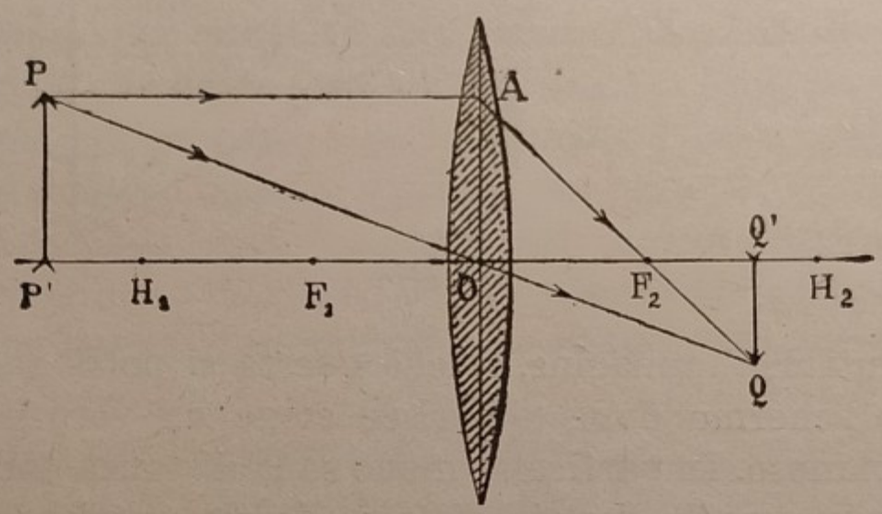


Fig. 292.

detto nel precedente paragrafo. Il raggio incidente PO prosegue inalterato il suo cammino ed esce dalla lente secondo OQ. I due raggi rifratti s'incontrano in Q che è l'immagine del punto P.

Or è dimostrato che a un oggetto posto in un piano perpendicolare all'asse principale di una lente corrisponde un'immagine posta pure sopra un piano perpendicolare all'asse e quindi l'immagine del segmento PP_1, che nella precedente figura è perpendicolare all'asse, è anche un segmento perpendicolare all'asse; per conseguenza tale immagine è il segmento QQ'.

Nelle condizioni della nostra figura l'immagine è reale e *rovesciata* rispetto all'oggetto, poichè questo è posto a una distanza dalla lente superiore alla distanza focale OF_1 della lente. Ponendo l'oggetto a distanze diverse dalla lente, le costruzioni eseguite con la regola precedente danno diversi risultati.

Se l'oggetto è posto a una distanza dalla lente *superiore* alla distanza focale l'immagine è *reale* e *rovesciata*; reale, significa che i raggi rifratti dalla lente concorrono effettivamente nei

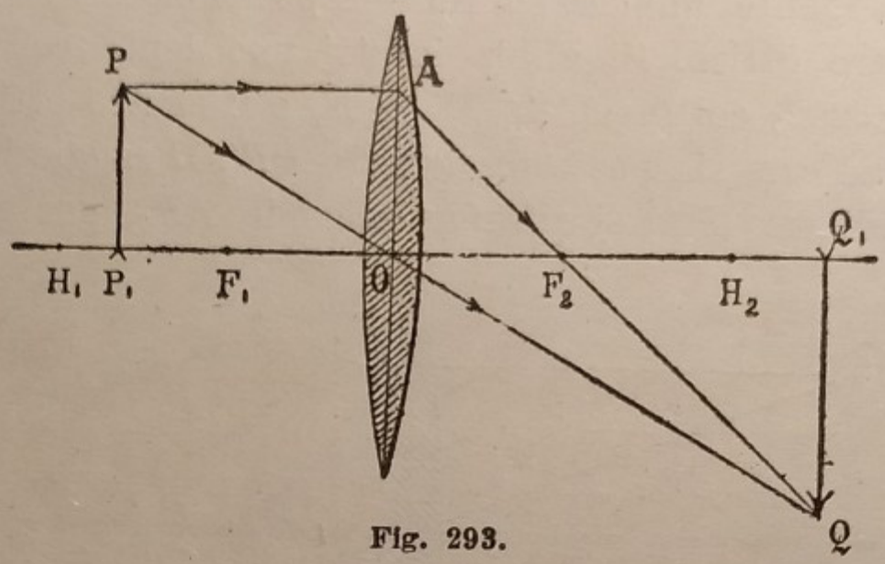


Fig. 293.

diversi punti dell'immagine, sicchè questa si potrà raccogliere sopra uno schermo dove apparisce come un vero e proprio oggetto luminoso. In particolar modo se la distanza dell'oggetto dalla lente *supera la doppia distanza focale*, com'era nel caso della figura 292, l'immagine, reale rovesciata, è *più piccola* dell'oggetto e posta a una distanza che supera la distanza focale, ma è inferiore alla doppia distanza focale stessa. Se l'oggetto è posto a una distanza dalla lente superiore alla distanza focale, ma inferiore alla doppia distanza focale, l'immagine è reale rovesciata, è *più grande* dell'oggetto e posta *oltre la doppia distanza focale*. Questo apparisce nella figura 293 costruita con la regola stabilita: PP_1 è l'oggetto e QQ_1 l'immagine.

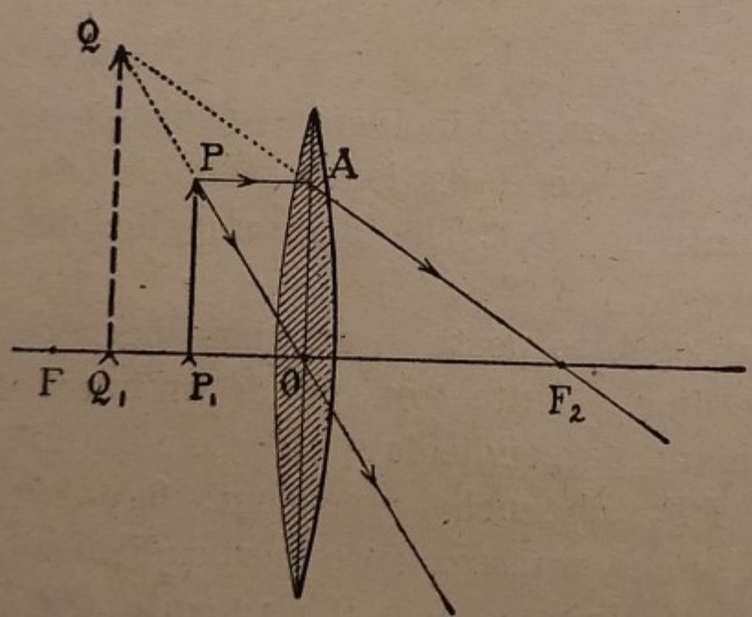


Fig. 294.

Se invece l'oggetto è posto a una distanza dalla lente *inferiore* alla distanza focale, l'immagine risulta virtuale, *diritta*,

più grande dell'oggetto (fig. 294). L'immagine QQ_1 dell'oggetto è dunque virtuale, ciò significa che in questo caso non i raggi effettivi rifratti, ma i loro prolungamenti s'incontrano nei diversi punti dell'immagine, come avveniva negli specchi piani. L'immagine virtuale è puramente *oculare* e non è possibile raccoglierle sopra uno schermo.

171. Immagini prodotte dalle lenti divergenti. — Anche per queste lenti esiste il centro ottico avente le proprietà che aveva nelle lenti convergenti e quindi è altrettanto facile costruire l'immagine di un oggetto data da una lente divergente quando se ne conoscano i fuochi e il centro ottico. Qui però le costruzioni che si potrebbero fare per i diversi casi di distanza dell'oggetto luminoso, portano a un unico risultato: *una lente divergente*

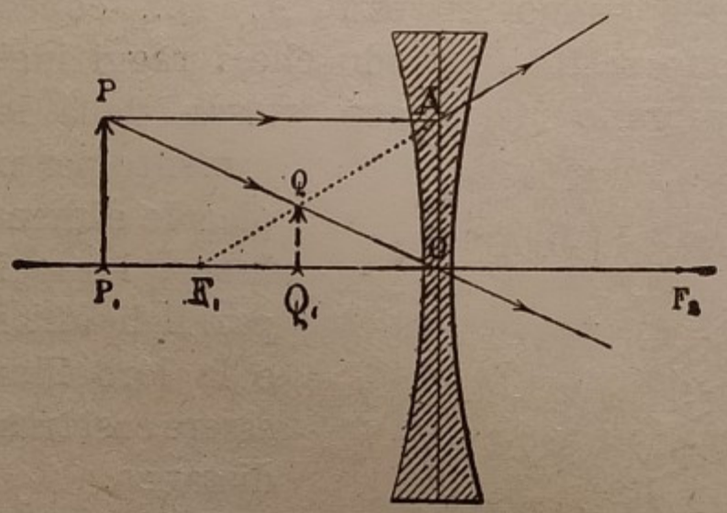


Fig. 295.

dà di un oggetto, comunque posto, un'immagine virtuale, diritta, più piccola dell'oggetto, posta fra il fuoco e la lente (fig. 295).

La verifica delle costruzioni esposte si può facilmente eseguire in classe con criteri analoghi a quelli adoperati per gli specchi.

172. Ingrandimento di una lente. — In generale l'oggetto e l'immagine non hanno le stesse dimensioni lineari, ma esse sono nel rapporto delle loro distanze dalla lente. Infatti in tutte le precedenti figure i triangoli PP_1O e QQ_1O sono simili per cui

$$\frac{QQ_1}{PP_1} = \frac{OQ_1}{OP_1}.$$

Il rapporto tra le dimensioni lineari dell'immagine e dell'oggetto è chiamato *ingrandimento*. Indicandolo con I, abbiamo dunque

$$I = \frac{QQ_1}{PP_1}.$$

173. Applicazione delle lenti. — Le lenti convergenti costituiscono la parte essenziale di molti strumenti ottici, quali i cannocchiali, il microscopio, gli apparecchi fotografici, ecc.

Nei *fari*, la sorgente luminosa è posta nel fuoco di una lente a *scaglioni*. Tale lente (figura 296) è formata di una lente centrale C piano-convessa, di piccola apertura, circondata di anelli piano-convessi A, B... concentrici, le cui curvature sono scelte in modo che i raggi incidenti paralleli all'asse convergano nel fuoco stesso della lente C. Inversamente per una sorgente di piccole dimensioni posta nel fuoco, i raggi rifratti sono paralleli all'asse del sistema e la loro illuminazione può essere così trasmessa a grande distanza.

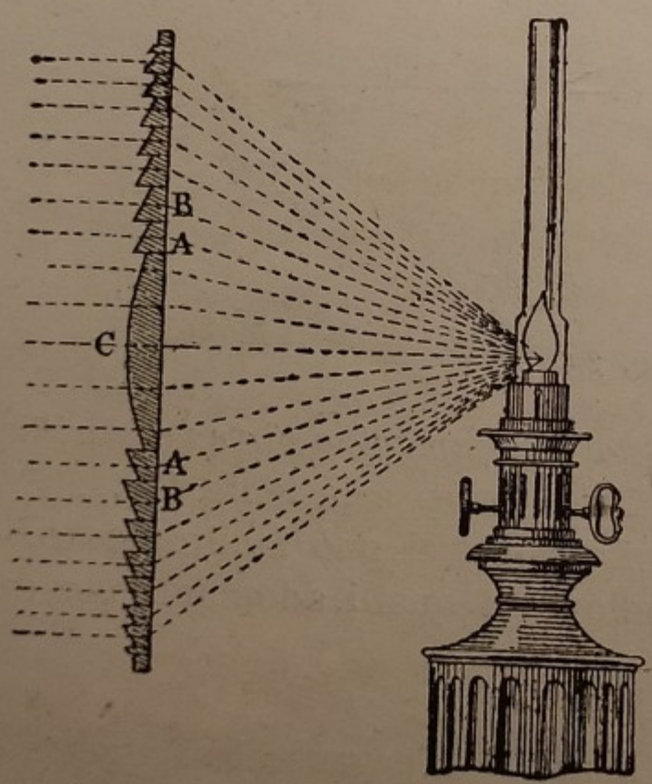


Fig. 296.

Un meccanismo d'orologeria fa muovere il sistema delle lenti con moto uniforme attorno a un asse che comprende la sorgente luminosa, in modo da illuminare successivamente tutti i punti dell'orizzonte. Secondo la rapidità del movimento, la durata delle eclissi intermittenti che si producono per uno stesso punto dell'orizzonte è più o meno grande, ed è questa durata che serve a distinguere i fari l'uno dall'altro o anche da un fuoco accidentale.

174. Dispersione della luce. — Parlando della rifrazione abbiamo accennato (164) che l'indice di rifrazione, oltre che variare da sostanza a sostanza, varia anche col colore della luce impiegata. Ciò è messo chiaramente in vista dalla famosa esperienza di Newton sulla *dispersione* o *decomposizione* della luce bianca.

Per un foro circolare A di 4 o 5 mm. di diametro, praticato nell'imposta di una stanza buia, si fa penetrare un fascetto cilindrico di raggi solari, il qual fascio disegna sopra uno

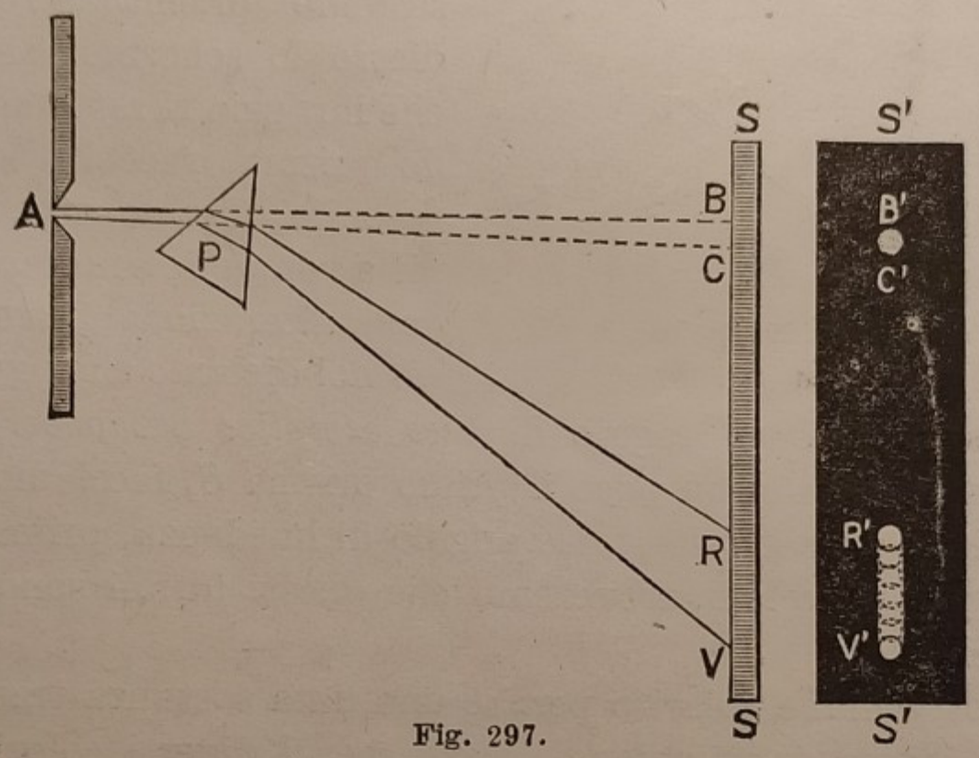


Fig. 297.

schermo posto di fronte all'imposta, un cerchietto bianco BC (fig. 297). Se si interpone un prisma di vetro P a spigoli orizzontali, si raccoglie sopra lo schermo una immagine RV deviata verso la base del prisma, *allungata* in direzione ortogonale agli spigoli del prisma.

Tale immagine, detta *spettro solare*, presenta diversi colori che si fondono in parte uno con l'altro e si distinguono, fra tutti, sette colori principali che si succedono nel seguente ordine, a partire da quello meno deviato: *rosso*, *aranciato*, *giallo*, *verde*, *azzurro*, *indaco*, *violetto*.

Nella luce bianca incidente si trovano tutti insieme i colori indicati, ma poichè essi sono diversamente rifrangibili, all'uscita dal prisma sono diversamente deviati, quindi l'occhio li vede qui separati nel loro vero colore, mentre la luce inci-

dente apparisce bianca, perchè ogni punto della retina è contemporaneamente eccitato dai diversi raggi.

Per dimostrare che i diversi raggi dello spettro sono diversamente rifrangibili, si raccoglie lo spettro sopra uno schermo annerito AB (fig. 298) munito di un piccolo foro, per il quale si può far passare solo i raggi di un solo colore, rosso, verde, ecc., che attraversano un secondo prisma P collocato dietro lo schermo. Si osserva che il raggio rifratto dal secondo prisma, raccolto sopra un secondo schermo, non si allarga più a ventaglio e non subisce alcuna alterazione di tinta. Perciò noi diciamo che ogni raggio dello spettro è un raggio di *luce semplice* o *monocromatica*.

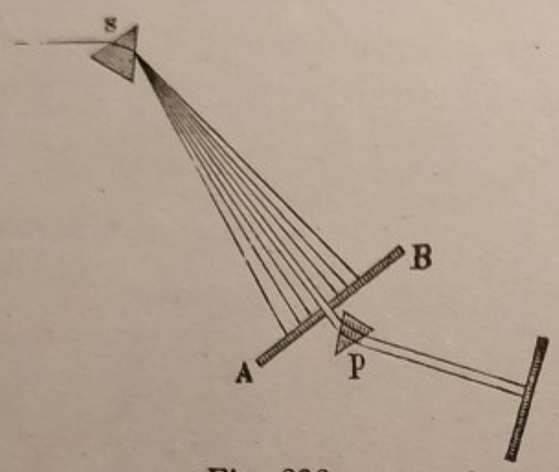


Fig. 298.

Se ora, girando un poco il primo prisma S, facciamo cadere sul prisma P, sotto lo stesso angolo di incidenza, prima i raggi rossi, poi i turchini, troveremo che questi ultimi sono deviati più dei primi.

E così rimane chiarito perchè una data sostanza trasparente ha un indice di rifrazione diverso per i diversi colori, indice che cresce come la deviazione, dal rosso al violetto.

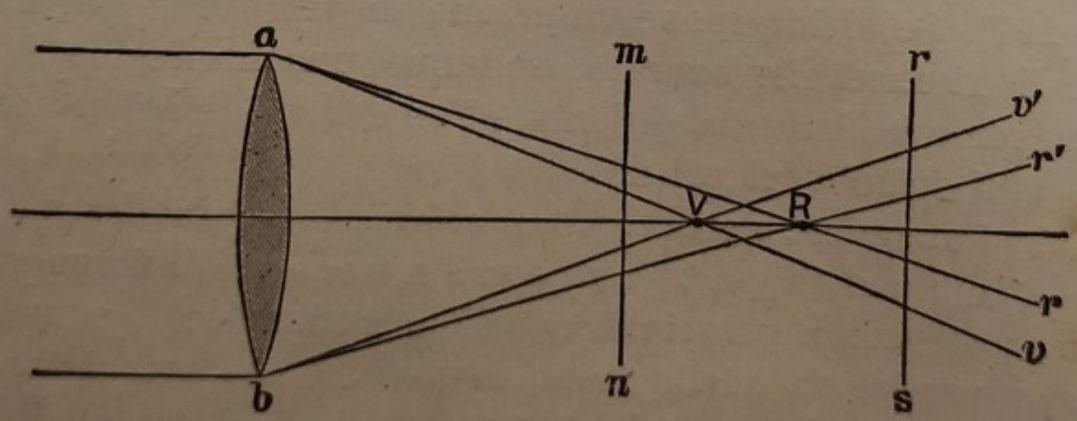


Fig. 299.

175. Lenti acromatiche. — Una lente convergente *ab* (fig. 299) non concentra *in un punto unico* i raggi uscenti da un punto

luminoso, se non alla condizione che i raggi incidenti siano dello stesso colore.

La lente infatti si comporta come una serie di prismi che hanno le basi volte verso l'asse; così che ciascun raggio è deviato verso l'asse, il violetto più del rosso.

Se, in un caso specifico, si fanno cadere sulla lente dei fascetti di luce bianca paralleli all'asse i raggi emergenti presentano quelli rossi il fuoco in *R*, quelli violetti in *V*.

Perciò se si interseca il fascio emergente con uno schermo bianco posto in *mn*, fra la lente e il fuoco *V*, si vede un cerchio luminoso, bianco nell'interno dove sono mescolati i raggi dei diversi colori che provengono dai diversi punti della lente, mentre il contorno del cerchio appare colorato dai raggi rossi e aranciati *aRr*, *bRr'*, meno deviati e che restano isolati dagli altri.

Invece ponendo lo schermo in *rs*, dopo il fuoco *R*, il contorno del cerchio apparisce colorato coi raggi azzurri e violetti *aVv*, *bVv'*, che ivi divengono esterni.

È per tale ragione che se si osserva un oggetto, ad esempio, uno scritto, con una lente convergente, si vedono iridescenti i bordi delle lettere, specialmente di quelle vedute verso l'orlo della lente.

Tale fenomeno è detto *aberrazione cromatica* delle lenti, e viene in massima parte eliminato con le lenti *acromatiche*. Una lente acromatica è formata da una lente *AA* convergente di vetro *crow* — silicato di potassio e calcio come il vetro comune — e di una lente divergente *BB* di vetro *flint* — vetro in cui a una parte della calce è sostituito dall'ossido di piombo —.

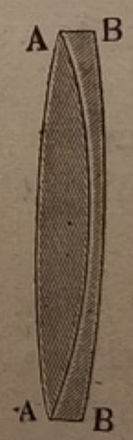


Fig. 300.

Le lenti combaciano l'una coll'altra (fig. 300).

Possiamo intuitivamente spiegare il fenomeno offerto dalla lente acromatica. Le due lenti producono ciascuna per conto proprio una deviazione e una dispersione; ma tanto l'uno che l'altro fenomeno avvengono in sensi opposti.

La lente convergente infatti (169) devia i raggi verso l'asse, mentre fa il contrario la lente divergente. Anche le due

dispersioni tendono ad avvenire in senso contrario, poichè la lente convergente è assimilabile, rispetto a un raggio che la investe, a un prisma avente la base sull'asse e quindi nella dispersione che essa produce i raggi rossi sono meno deviati verso l'asse e quelli violetti più deviati. Il contrario si manifesta per effetto della lente divergente assimilabile a un prisma avente invece l'angolo rifrangente verso l'asse.

Le lenti sono costruite in modo che producano la stessa dispersione, ma che quella convergente di crown produca maggiore deviazione. Il risultato è che le due dispersioni eguali e contrarie si annullano e la luce emerge dal sistema collo stesso colore della luce incidente, bianco se è bianca, donde il nome di *lente acromatica*, ma emerge deviata verso l'asse nel verso della preponderante deviazione prodotta dalla lente convergente.

Strumenti ottici.

Gli *strumenti ottici* modificano le condizioni della visione degli oggetti, sostituendo a questi delle immagini talora reali, tal'altra virtuali, in condizioni più favorevoli di quelle in cui si trovano gli oggetti stessi.

Gli strumenti che forniscono immagini *reali* si dicono strumenti ottici *obbiettivi*, quelli che dànno immagini *virtuali* si dicono *oculari*.

176. L'occhio e il meccanismo della visione. — Premettiamo agli strumenti ottici artificiali, la descrizione di uno strumento preziosissimo, l'*occhio*, limitandoci a dire brevemente dell'occhio umano.

Esso è un corpo di forma presso a poco sferica, incassato nelle cavità orbitali. L'involucro esterno detto *sclerotica* è una membrana *SS* (fig. 301) resistente, fibrosa, dappertutto opaca, tranne per una porzione anteriore più curva *CC*, che vien detta *cornea*.

Nella parte anteriore della sclerotica sono attaccati 6 muscoli, due dei quali si vedono in *MM*, che servono a imprimere all'occhio i diversi movimenti.

Sotto la sclerotica si trova una membrana sottile, vascolare *cc*, detta *coroide*, che tappezza la sclerotica, tranne che nella parte anteriore. La coroide è nera, per uno speciale pigmento, di guisa che l'interno dell'occhio è una vera e propria camera oscura. Dietro la cornea c'è una membrana *ii* detta *iride*, perchè è diversamente colorata nei diversi individui, attaccata col perimetro alla coroide.

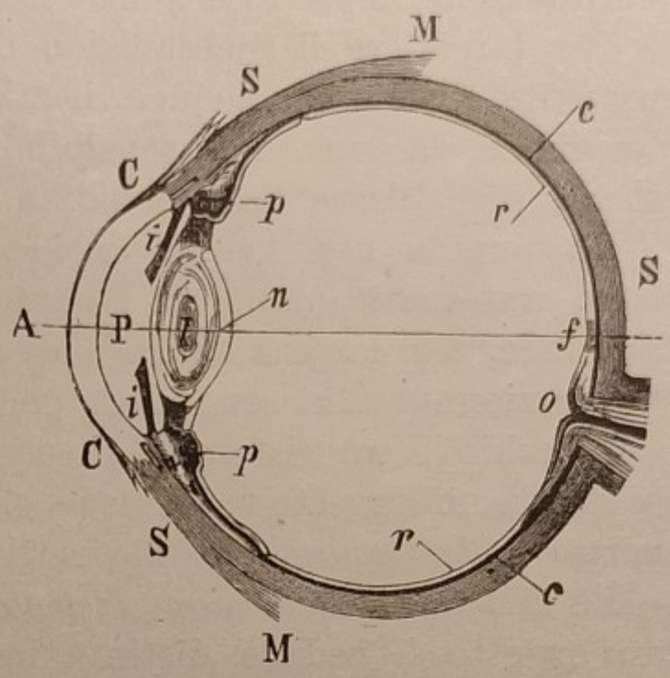


Fig. 301.

L'iride, che divide l'occhio in due scompartimenti disuguali, è un diaframma munito di un foro centrale *P*, di 3 a 4 mm. di diametro, detto *pupilla*, per il quale la luce penetra nell'occhio.

Lo spazio fra la cornea e l'iride, avente la forma di un menisco convergente, è occupato da un liquido incoloro, l'*umor acqueo*, avente presso a poco lo stesso indice di rifrazione dell'acqua.

Immediatamente dietro l'iride si trova il *cristallino n*, un corpo che ha la forma di una lente biconvessa, più curva nella faccia posteriore, costituito di una sostanza gelatinosa consistente e trasparente, più rifrangente dell'umor acqueo, e formato di diversi strati sovrapposti. Il cristallino aderisce nel bordo coi muscoli *pp*, muscoli *ciliari*, che formano il prolungamento esterno della coroide.

Dietro il cristallino, la camera posteriore dell'occhio è piena del così detto *umor vitreo*, liquido trasparente gelatinoso, di indice presso a poco eguale a quello dell'umor acqueo.

Sul fondo dell'occhio la coroide è coperta da una membrana *rr* sottilissima, formata da un intreccio a mo' di rete, e perciò

detta *rètina* o *retìna*, degli ultimi filamenti del *nervo ottico* O che vien dal cervello. È il nervo ottico che trasmette al cervello l'impressione della luce sulla retina.

Per intendere il meccanismo della visione è d'uopo tener presente che l'umor acqueo, il cristallino e l'umor vitreo sono terminati da superficie sensibilmente sferiche, centrate sullo stesso asse, l'asse dal cristallino.

La pupilla non lascia passare che i raggi vicini all'asse. Essa automaticamente si dilata nell'oscurità e si restringe alla luce, così la quantità di luce che penetra nell'occhio viene proporzionata alla sensibilità della retina.

L'occhio è un sistema convergente e per la perfetta visibilità di un oggetto si richiede che la sua immagine si formi netta, *reale*, *capovolta*, sulla retina.

La *distanza della visione distinta*, cioè la distanza alla quale un oggetto è veduto distintamente, è variabile, e i suoi limiti sono abbastanza estesi, in grazia dell'*accomodamento* dell'occhio alle diverse distanze. L'occhio che guarda un oggetto è accomodato particolarmente per quell'oggetto e non per oggetti più distanti o più vicini. Tenendo un sol occhio aperto, piantate due spille sul tavolo a distanze diverse, se si fissa la prima la si vede netta, ma l'altra apparisce confusa, e inversamente.

L'occhio non è equivalente a una lente convergente a distanza focale fissa, se ciò fosse non ci sarebbe che una distanza unica per la visione distinta; l'accomodamento di cui si è parlato avviene appunto per modificazione della convergenza dell'occhio. Tale modificazione è operata dal cristallino, *la faccia anteriore del quale può divenire più o meno convessa*, e precisamente più convessa per la visione di oggetti vicini, meno convessa per la visione di oggetti distanti.

177. Occhio normale. Ametropie. — Ma l'accomodamento non può superare certi limiti, compresi tra due punti, detti *punto remoto* e *punto prossimo*. Il primo è il punto più distante, che si può vedere *senza accomodamento*, l'altro il punto più vicino visibile *con accomodamento*; la distanza di quest'ultimo punto è detta *distanza minima della visione distinta*.

In base a ciò un occhio vien detto *normale* o *emmetropico* — in misura — se, in riposo, è accomodato all'infinito; il punto prossimo dipende dall'età dell'individuo. Per un adulto la distanza del punto prossimo è circa $0^m,15$; ma per sottrarre l'occhio a uno sforzo di accomodamento troppo grande, si legge o si scrive alla distanza di $0^m,25$.

Molti individui hanno l'occhio in riposo non accomodato all'infinito, l'occhio si dice allora *ametropico* — fuor di misura —.

Le principali ametropie visive sono:

1° La *miopia* o *brachimetropismo*. In questo caso i raggi che vengono dall'infinito convergono prima della retina; ciò avviene per essere l'occhio o *troppo convergente* o *troppo lungo*. E poichè l'accomodamento, se interviene, ha per effetto di aumentare la convergenza e quindi di spostare l'immagine ancora più in avanti, è chiaro che i miopi non vedono bene che al di qua di un certo punto R chiamato *punto remoto del miope*.

Mediante una lente divergente di appropriata distanza focale si può correggere il difetto, di guisa che i raggi provenienti da un punto lontanissimo, giungano all'occhio del miope come se provenissero da R, e in tal caso l'occhio del miope vien messo nelle condizioni dell'occhio normale.

2° L'*ipermetropia*, per cui i raggi provenienti dall'infinito convergono dietro la retina. L'occhio o è *poco convergente* o *troppo corto*. Mercè l'accomodamento l'occhio può istintivamente portare l'immagine sulla retina, ma questo accomodamento riesce difficile per la visione di oggetti vicini, perciò gli ipermetropi non vedono bene che al di là di un certo punto P detto *punto prossimo dell'ipermetropico* che è più lontano di quello dell'occhio normale.

Un caso particolare di ipermetropia è la *presbiopia*. Per qualunque occhio la facoltà di accomodamento diminuisce coll'età, per il fatto che la flessibilità del cristallino mano a mano diminuisce. Perciò il punto prossimo si allontana, e si ha

presbiopia quando esso risulta distante da 50 a 60 cm. Il presbite per leggere un libro deve tenerlo molto distante.

Ponendo davanti ad un occhio ipermetropico una lente convergente, lo si pone nelle condizioni di un occhio normale, perchè in tal modo si possono far convergere sulla retina i raggi provenienti dall'infinito, senza sforzo di accomodamento.

178. Persistenza delle immagini sulla retina. — Quando l'occhio ha subìto un'impressione luminosa, cessando l'azione della luce, la sensazione resta ancora per un tempo brevissimo, che si valuta a circa 0,1 secondi.

Se delle immagini si succedono sulla retina ad intervalli di tempo più brevi, si ha una sensazione continua. Ognuno sa, ad esempio, che girando rapidamente un tizzone acceso, si ha l'impressione di un cerchio luminoso. Una corda sonora rapidamente vibrante acquista l'aspetto di un fuso.

Tale proprietà è utilizzata nel cinematografo, come si dirà in appresso.

179. Visione binoculare. Sensazione del rilievo. — Guardando un oggetto molto distante o una figura piana, le due immagini retinee sono sensibilmente identiche. Ma se gli oggetti sono a tre dimensioni e non sono troppo distanti dall'occhio, le due immagini sono diverse; l'occhio destro vede un po' più della parte destra dell'oggetto, l'occhio sinistro un po' più della parte sinistra. Per persuadersene basta guardare successivamente coll'occhio destro e coll'occhio sinistro, tenendo ferma la testa, un oggetto a contorni ben netti, come un dado da gioco (fig. 302). La sensazione del rilievo risulta dalla differenza delle due immagini e dalla loro impressione sul cervello che è unica.

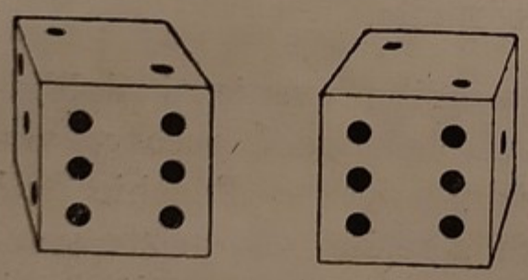


Fig. 302.

La conferma di questa spiegazione viene data dallo *stereoscopio*. Esso è una scatola (fig. 303) sul fondo della quale vengono poste due fotografie d'uno stesso oggetto, prese con una macchina fotografica, così detta stereoscopica, cioè formata di due macchine fotografiche identiche accoppiate, i cui obbiettivi sono distanti l'uno dall'altro quanto i due occhi. Queste fotografie sono un po' diverse (fig. 304) gli oggetti dei primi piani riuscendo proiettati su punti diversi dei piani posteriori. La fotografia che riproduce una porzione maggiore della parte destra dell'oggetto è posta davanti l'occhio destro, l'altra che riproduce una porzione un

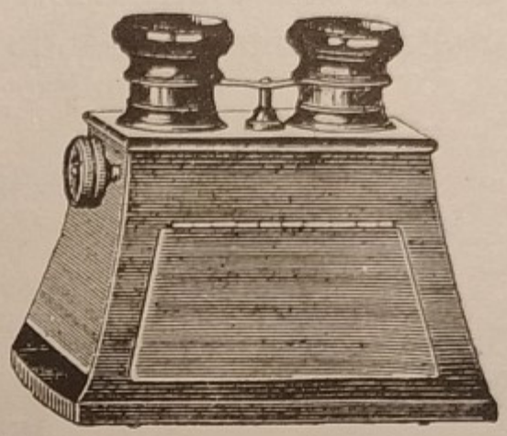


Fig. 303.

Fig. 304.

po' più grande della parte sinistra, davanti l'occhio sinistro. L'osservatore guarda le due fotografie attraverso due lenti convergenti poste in modo da dare un'immagine virtuale delle due figure; e poichè in tal modo ciascuna delle due figure, vista coll'occhio corrispondente, presenta a ognuna delle due retine l'immagine che le si conviene, la simultaneità delle due impressioni dà luogo alla perfetta percezione del rilievo.

180. La visione dei colori. — È stato detto (174) che la luce bianca, ottenuta dal Sole o da una comune lampada, non è luce semplice, ma costituita da diversi colori. Se si ricombinano tra loro tali colori si riottiene la luce bianca. Ciò si può ottenere molto facilmente usando il *disco colorato di Newton* (fig. 305).

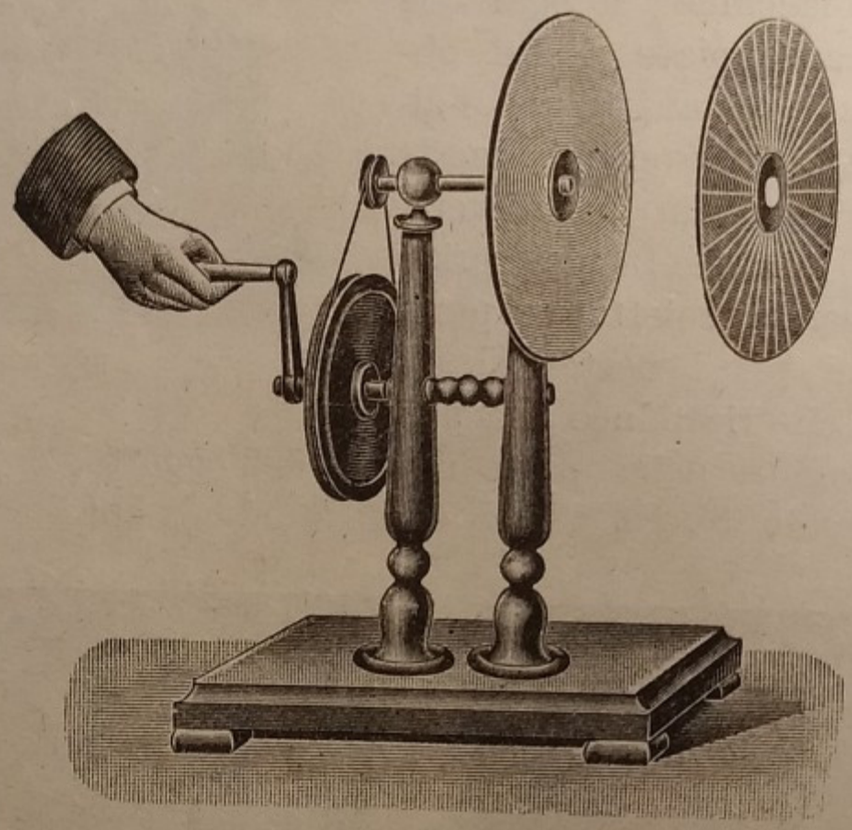


Fig. 305.

Esso è un disco di cartone sul quale sono incollati di seguito sette settori presentanti i sette colori principali dello spettro. Imprimendo al disco un rapido moto di rotazione attorno al suo asse, la superficie del disco apparisce bianca, o almeno di un bianco grigio. Ciò a causa della persistenza delle immagini sulla retina. Infatti, supposto che un disco bianco porti un solo settore rosso, finchè gira lento si vede il settore occupare successivamente diverse posizioni. Ma se la rotazione si effettua con un periodo minore di $^1/_{10}$ di secondo, il settore è visto contemporaneamente in tutte le posizioni, e il disco apparisce tutto rosso.

Ciascuno dei settori colorati del disco di Newton produce sull'occhio l'effetto d'un disco intero del colore del settore stesso e la sovrapposizione delle diverse impressioni dà la sensazione del bianco.

Per avere la sensazione del bianco non occorre il concorso di tutti i colori dello spettro, ma bastano soltanto due; ed esistono varie coppie di colori che uniti dànno il bianco. Si dicono *complementari* i due colori di tali coppie. Così sono complementari il rosso e l'azzurro-verdastro; l'azzurro e l'aranciato; il violetto e il giallo-verdastro.

E notisi che l'occhio non riesce affatto a distinguere il bianco, diremo così normale, cioè quello formato dalla sovrapposizione di tutti i colori dello spettro, dal bianco formato da due colori complementari.

Aggiungiamo che ancora non è ben nota la *teoria della sensazione dei colori*, ma si ammette generalmente che in via normale esistano in ogni punto della retina tre sole specie di nervi diversi, i nervi per la sensazione del rosso, quelli per il verde e quelli per il violetto. Tutte e tre le specie verrebbero eccitati da qualsiasi luce monocromatica, ma in diversa misura; la prima con più forza dai raggi che stanno verso il rosso dello spettro, la seconda dai raggi verdi, la terza dai violetti. Vista così la cosa, la sensazione bianca sarebbe il risultato di una eguale eccitazione delle tre specie di nervi; il nero sarebbe dovuto al riposo di tutti i nervi, il grigio ad eccitazioni deboli ma eguali per tutte le tre specie.

Tale teoria rende ragione di una non infrequente malattia, il *daltonismo*, per la quale non si discernono bene i colori per una parziale cecità dei nervi della prima specie. Chi ne è affetto non vede l'estremo rosso dello spettro, e per lui lo spettro si riduce a due regioni sfumate, l'una che va dal giallo al verde che egli chiama gialla e l'altra che per lui è azzurra, separate da una zona grigia.

Il fenomeno è chiamato con tal nome perchè ne era affetto il fisico Dalton.

181. Colori dei corpi. — Il colore di un corpo *trasparente* dipende dall'assorbimento operato dal corpo. Questo è *incoloro* se lascia passare egualmente i raggi di tutti i colori; ed è *colorato* se lascia passare solo certi raggi e assorbe gli altri.

È *opaco* se li assorbe tutti completamente; così un sistema di due vetri rosso e bleu sovrapposti è perfettamente opaco.

La visibilità dei corpi dipende dalla luce che diffondono; ed appariscono *bianchi* quei corpi che diffondono egualmente tutti i raggi; sono *invisibili* quelli che li assorbono tutti e appariscono colorati quelli che diffondono certi raggi e assorbono certi altri.

Perciò si capisce che il colore di un corpo dipende dalla qualità della luce che lo investe. Una stoffa rossa apparisce rossa se è illuminata con luce rossa o bianca, ma se è illuminata con luce verde apparisce invece nera.

E siccome certe luci artificiali, come ad esempio le fiamme del gas, del petrolio, delle candele, presentano un eccesso di rosso e un difetto di violetto rispetto alla luce solare, e certe altre, come l'arco elettrico, un eccesso di azzurro e di violetto, le stoffe colorate possono presentare toni diversi viste alla luce del giorno o a luce artificiale.

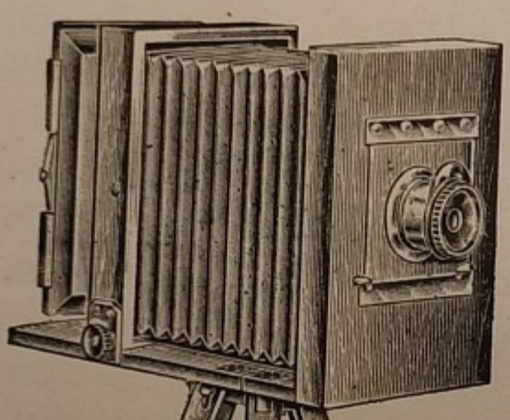


Fig. 306.

182. Apparecchio fotografico. — È formato di una camera allungabile con le pareti laterali a *soffietto* (fig. 306). Le pareti sono annerite internamente. Ad un foro praticato nella parete anteriore è fissato l'*obbiettivo* (fig. 307), cioè un sistema di lenti che

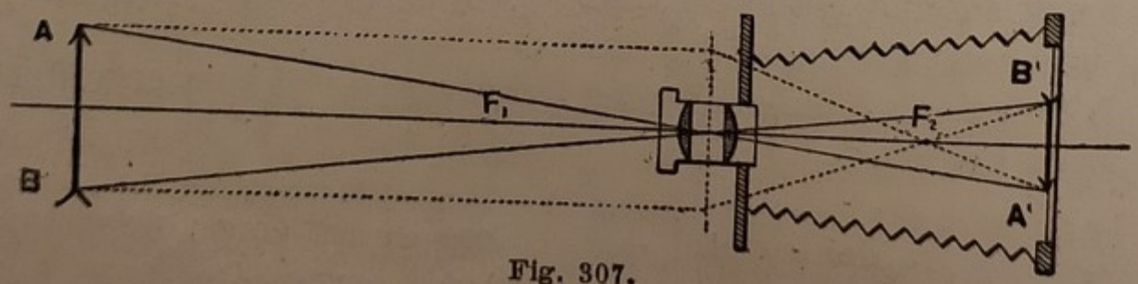


Fig. 307.

funziona in linea generale come una lente convergente. La parete posteriore porta un vetro smerigliato, posto poco al di là del secondo fuoco, sul quale, allungando più o meno la

camera, si fa cadere l'immagine reale A_1B_1 capovolta, più piccola dell'oggetto AB, posto a una distanza dall'apparecchio superiore alla doppia distanza focale dell'obbiettivo.

Fig. 308.

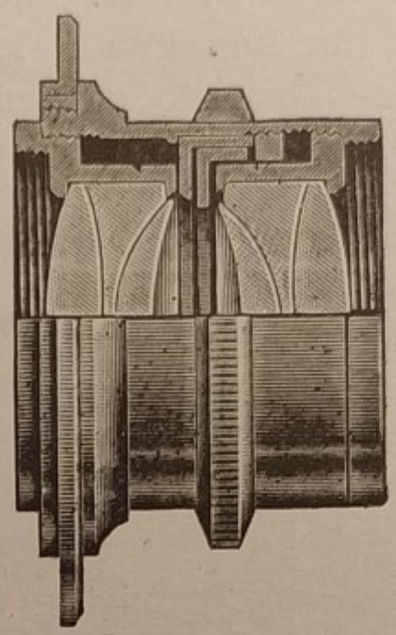


Fig. 309.

L'obbiettivo, come s'è accennato, è costituito di almeno due lenti (fig. 308) per realizzare l'acromatismo, ma più spesso è un sistema più complesso formato di parecchie lenti. Quello della figura 309 ne porta 6.

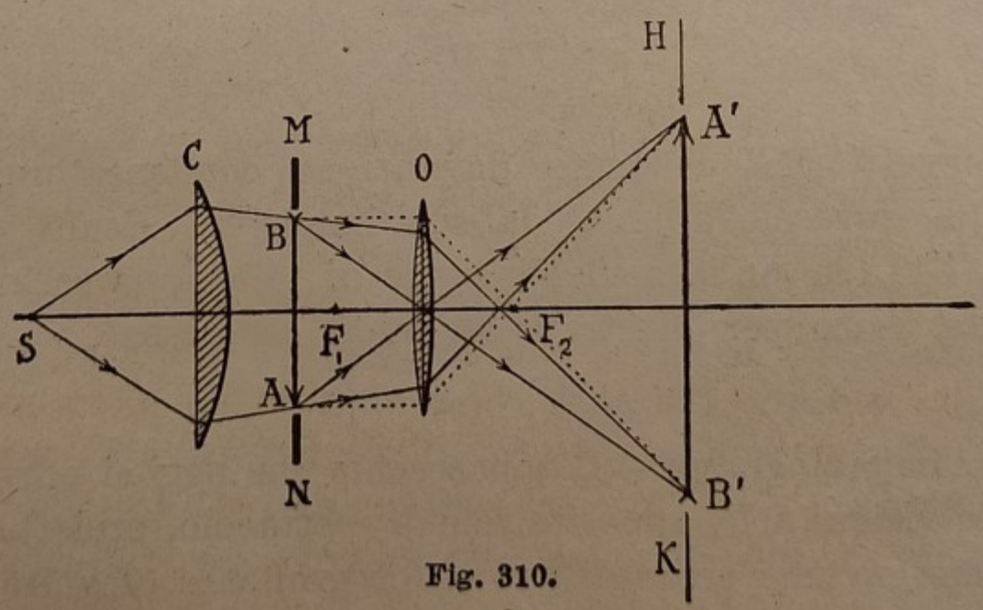


Fig. 310.

183. Apparecchio di proiezione. — La parte essenziale di tale apparecchio è un obbiettivo O (fig. 310) che dà sopra uno schermo HK l'immagine $A'B'$ *reale, capovolta, ingrandita*, di

un piccolo oggetto trasparente *AB*. La luminosità dell'immagine diminuisce quanto maggiore è l'ingrandimento, per conseguenza l'oggetto è fortemente illuminato da una sorgente luminosa *S*, i cui raggi vengono resi convergenti verso l'oggetto da una grossa lente pianò-convessa *C* detta *condensatore*. L'oggetto da proiettarsi, che è quasi sempre una fotografia su vetro o su celluloide, viene disposto in un

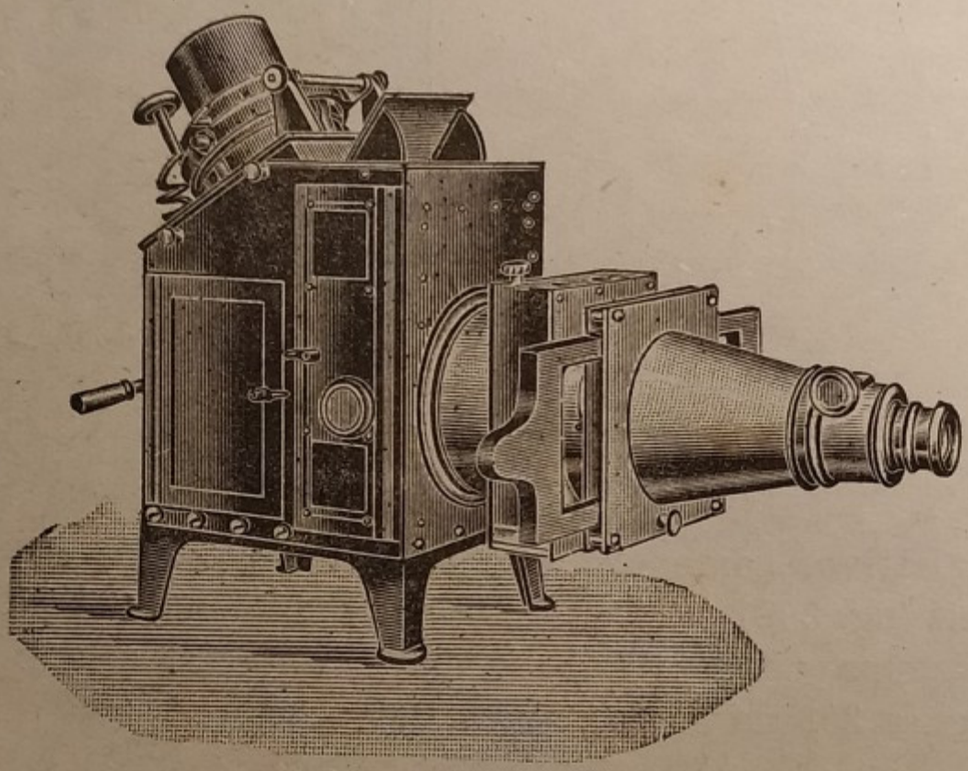


Fig. 311.

porta-oggetti *MN* collocato davanti al condensatore, ed è messo a rovescio affinchè la sua immagine risulti diritta. La fig. 311 dà un'idea dell'insieme di tale apparecchio, largamente usato per illustrare lezioni e conferenze.

184. Cinematografo. — L'apparecchio che oggi ci offre tante svariate visioni nelle apposite sale di spettacolo, proietta sopra uno schermo una serie di prove fotografiche, eseguite sopra un nastro di celluloide — *film* — e ottenute con uno speciale apparecchio di presa (fig. 312). L'oggetto, ordinariamente una scena animata, viene fortemente illuminato con luce continua, e se ne ottiene una serie di fotografie, succedentisi

sopra una lunga pellicola fotografica, che entro l'apparecchio si svolge con un conveniente movimento. Il moto della pellicola è tale che essa resta immobile durante i piccolissimi intervalli di tempo che la luce dell'oggetto da fotografarsi penetra nell'apparecchio. Occorre perciò sapere che nella macchina di presa la luce entra ad intervalli, ottenuti adattando all'obbiettivo un *disco otturatore* munito di finestre radiali equidistanti ed animato da un rapido movimento rotatorio uniforme. Il moto della pellicola è regolato in modo che essa resta immobilizzata durante ciascun piccolo intervallo di tempo in cui la luce la colpisce.

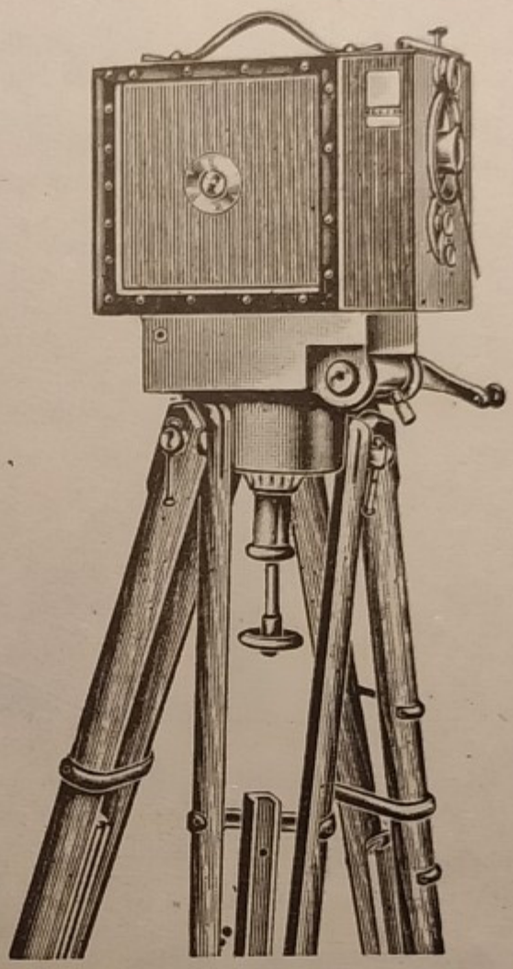


Fig. 312.

Sviluppando la pellicola coi soliti processi noti in fotografia, si otterrà una serie di numerosissime fotografie disposte una di seguito all'altra, che sono evidentemente qualche po' diverse l'una dall'altra, se l'oggetto riprodotto è in movimento.

Tale pellicola si trasforma in positiva, e questa vien fatta passare in un apparecchio di proiezione (figura 313), nel quale ripete lo stesso movimento che la pellicola negativa ha eseguito nell'apparecchio di presa. Nell'apparecchio di proiezione esiste pure un ôtturatore girante, di modo che uno dei settori pieni arresta la luce mentre la pellicola discende, e un settore vuoto lascia passare la luce sullo schermo nel piccolo intervallo in cui la pellicola è ferma.

In tal modo si succedono sullo schermo, a intervalli brevissimi di tempo, le immagini delle diverse fotografie nell'ordine in cui sono state ottenute nell'apparecchio di presa; e

per la persistenza delle immagini sulla retina, le eclissi che separano gli intervalli di luce passano inavvertite, alla con-

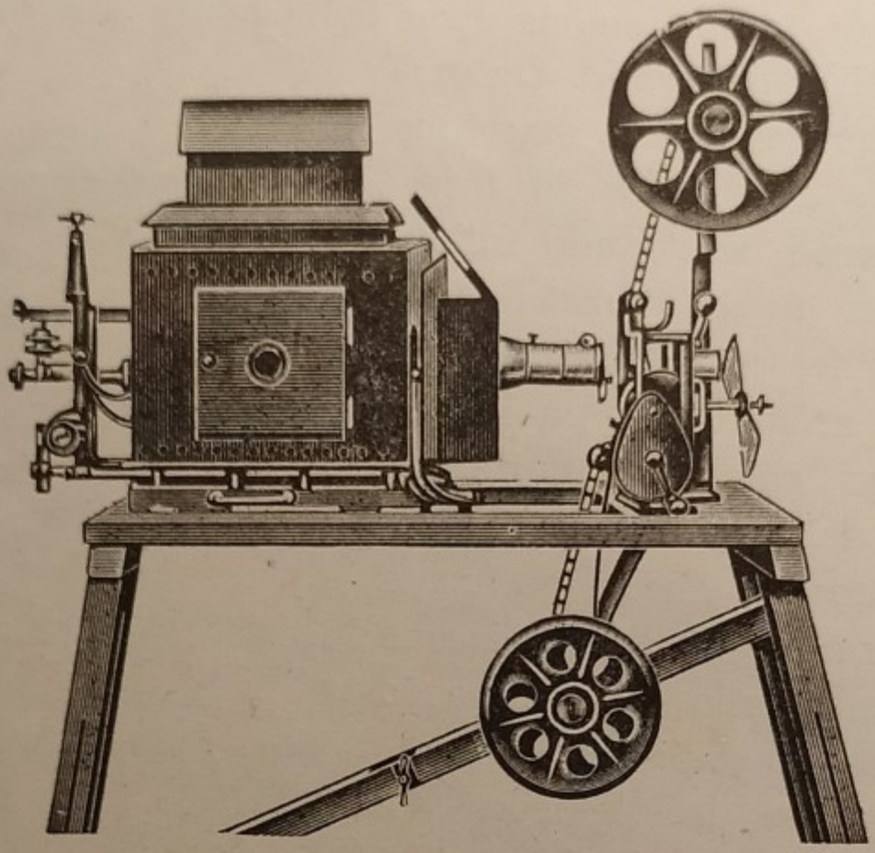


Fig. 313.

dizione che il numero delle immagini proiettate sia di almeno 15 al secondo, e lo spettatore ha l'*illusione del movimento* delle persone e degli oggetti.

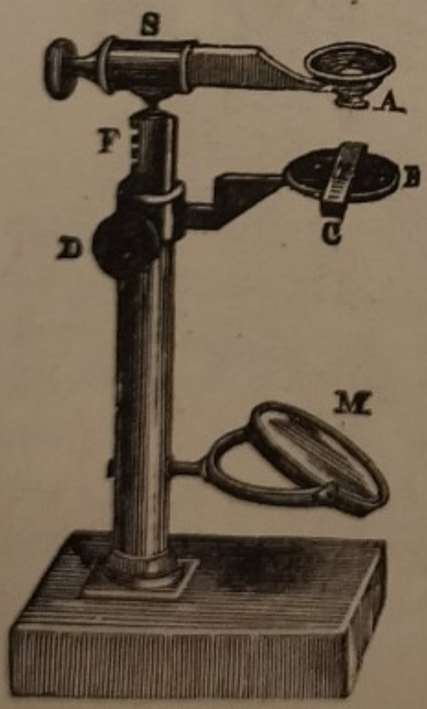


Fig. 314.

185. Lente d'ingrandimento o microscopio semplice. — È una lente convergente a corto fuoco, che dà di un piccolo oggetto un'immagine *virtuale ingrandita*, e che permette di vedere meglio che ad occhio nudo i dettagli dell'oggetto.

La posizione dell'oggetto e la formazione dell'immagine sono illustrate nella figura 294 del § 170. Funzionano in tal modo la lente usata dall'orologiaio, le lenti dei presbiti e simili.

Talvolta la lente *A* (fig. 314) è montata sopra un sup-

porto S munito di più movimenti, e l'oggetto da esaminare è posto sopra un porta-oggetti B. Se l'oggetto è più o meno trasparente, lo si può illuminare mediante un piccolo specchio M posto in basso.

186. Microscopio composto. — Un ingrandimento molto maggiore si ottiene col *microscopio composto*, che serve al-

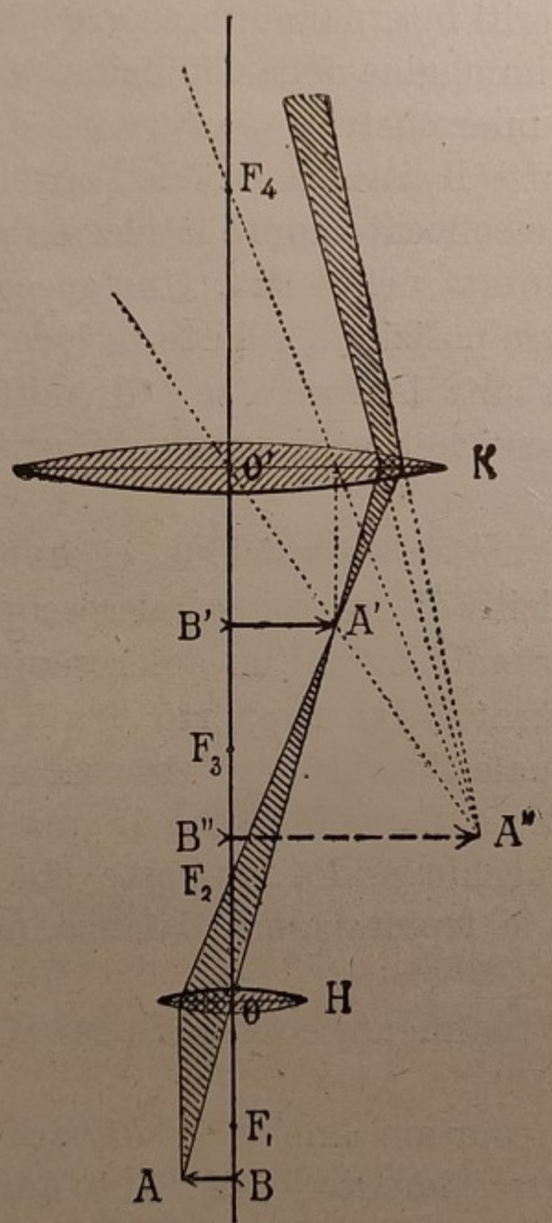


Fig. 315.

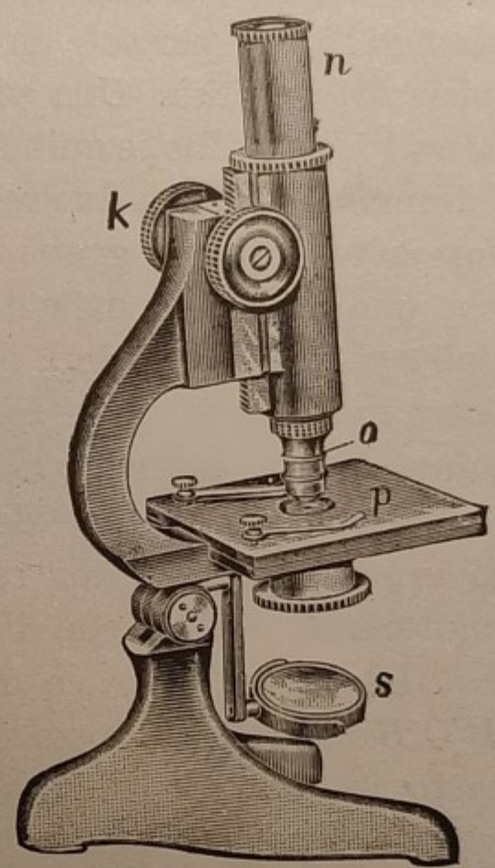


Fig. 316.

l'esame di oggetti troppo piccoli per poter essere osservati con una lente d'ingrandimento.

Lo strumento è formato dell'*obbiettivo*, un sistema convergente di lenti, che per semplicità supporremo ridotto a una sola lente convergente H (fig. 315), destinato a dare dell'oggetto AB, posto poco al disotto del primo fuoco, un'immagine

reale, *ingrandita*, *rovesciata* $A'B'$, e di un *oculare* che è pure un sistema convergente, schematicamente rappresentato da una sola lente convergente K.

L'immagine reale $A'B'$ viene osservata attraverso l'oculare K, che funziona come una lente d'ingrandimento e fornisce all'occhio l'immagine virtuale ingrandita $A''B''$. La fig. 316 rappresenta l'apparecchio nel suo insieme.

L'obbiettivo O e l'oculare n sono fissati alle estremità opposte di due tubi di ottone, anneriti internamente, scorrevoli l'uno dentro l'altro, per ottenere l'immagine nelle condizioni più propizie di visibilità. Una vite micrometrica k avvicina o allontana l'intero tubo, e quindi tutto il sistema $n\,o$, dall'oggetto che è immobilizzato fra due vetri e collocato sopra la piccola piattaforma p — porta-oggetti — forata nel centro. Uno specchio S, che può orientarsi nelle diverse posizioni, riflette la luce, presa dall'esterno se è giorno, o da una lampada se è di notte, dal sotto in su verso l'oggetto, che viene così convenientemente illuminato per trasparenza.

L'indole elementare della nostra esposizione ci impedisce di esporre i principali requisiti di un buon microscopio: ci limiteremo a dire che l'*ingrandimento* d'un microscopio *per un dato osservatore*, è misurato dal rapporto fra l'angolo $A''O'B'' = A'O'B'$ sotto il quale l'occhio dell'osservatore supposto in O' vede l'immagine, e l'angolo sotto il quale l'osservatore vede l'oggetto ad occhio nudo, supposto che tanto l'immagine quanto l'oggetto si trovino alla distanza minima della vision distinta.

I più potenti microscopî attualmente costruiti possono arrivare a un ingrandimento di 2400.

Tale ingrandimento lo si esprime anche in *diametri*; nel caso citato si dice che l'ingrandimento è di 2400 diametri.

Nel maggior numero dei casi però si oltrepassa raramente 800 e si scende spesso verso i 60 diametri.

Si dice infine *potere separatore* di un microscopio la più piccola distanza che il microscopio permette di scorgere, e più precisamente la più piccola distanza tra due finissimi tratti paralleli che appariscono distinti; si può arrivare a $0^{\mu},2$.

Il microscopio è un apparecchio prezioso nelle scienze naturali e nella biologia, per riconoscere la falsificazione delle farine, delle fecole, del the, ecc.

187. Cannocchiale astronomico. — I *cannocchiali* in genere sono apparecchi che servono per esaminare oggetti molto distanti. Sono costituiti di un *obbiettivo* a grande superficie e a lungo fuoco, che dà dell'oggetto un'immagine reale, e d'un *oculare* a corto fuoco, che fa l'ufficio di lente d'ingrandimento, e dà di tale immagine reale un'immagine virtuale ingrandita, in certi casi rovesciata, in certi altri diritta.

Il *cannocchiale astronomico*, così chiamato, perchè serve sopratutto allo studio delle stelle, dà immagini rovesciate.

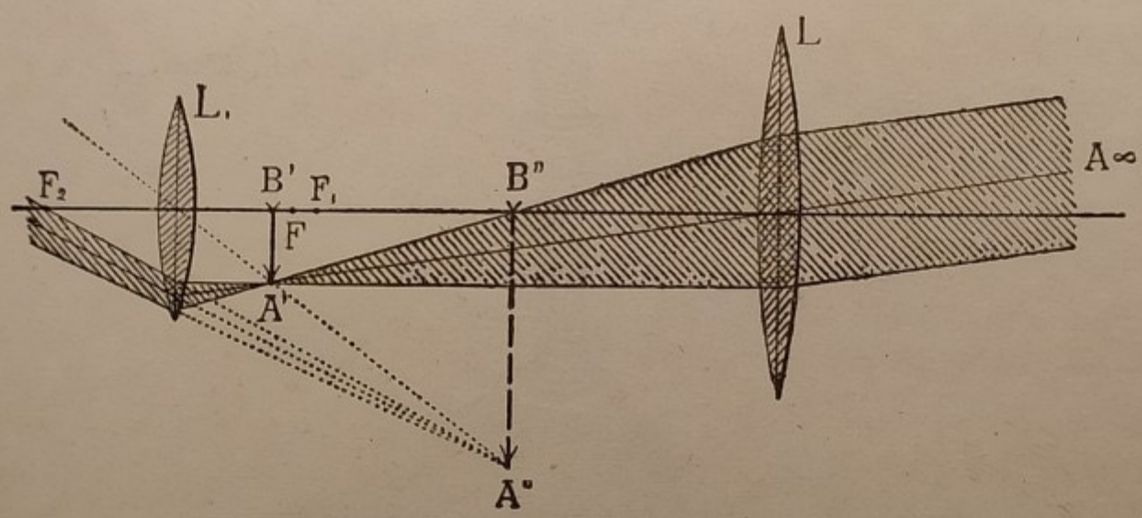


Fig. 317.

L'obbiettivo L (fig. 317) dà dell'oggetto AB, posto molto lontano, una piccola immagine reale $A'B'$, posta sensibilmente nel suo piano focale. Questa immagine viene osservata mediante l'oculare L_1 il cui fuoco principale F_1 è un po' a destra del fuoco F dell'obbiettivo; si ha così un'immagine virtuale $A''B''$ rovesciata rispetto all'oggetto.

La messa a fuoco non può effettuarsi che facendo variare la distanza delle due lenti. Perciò l'oculare è montato all'estremità M di un tubo, scorrevole dentro il tubo maggiore, all'estremità P del quale è fissato l'obbiettivo (figura 318). Si può in tal modo avvicinare o allontanare l'oculare dall'obbiettivo finchè l'immagine $A''B''$ sia massimamente netta.

Quando si guarda un oggetto col cannocchiale, l'angolo formato dalle due visuali che vanno all'estremità dell'immagine $A''B''$ è detto *diametro apparente dell'oggetto* visto col cannocchiale, e l'angolo formato dalle visuali che vanno all'estremità dell'oggetto quando si guarda ad occhio nudo, si dice *diametro apparente dell'oggetto* visto ad occhio nudo: il loro rapporto vien detto *ingrandimento* del cannocchiale, e come

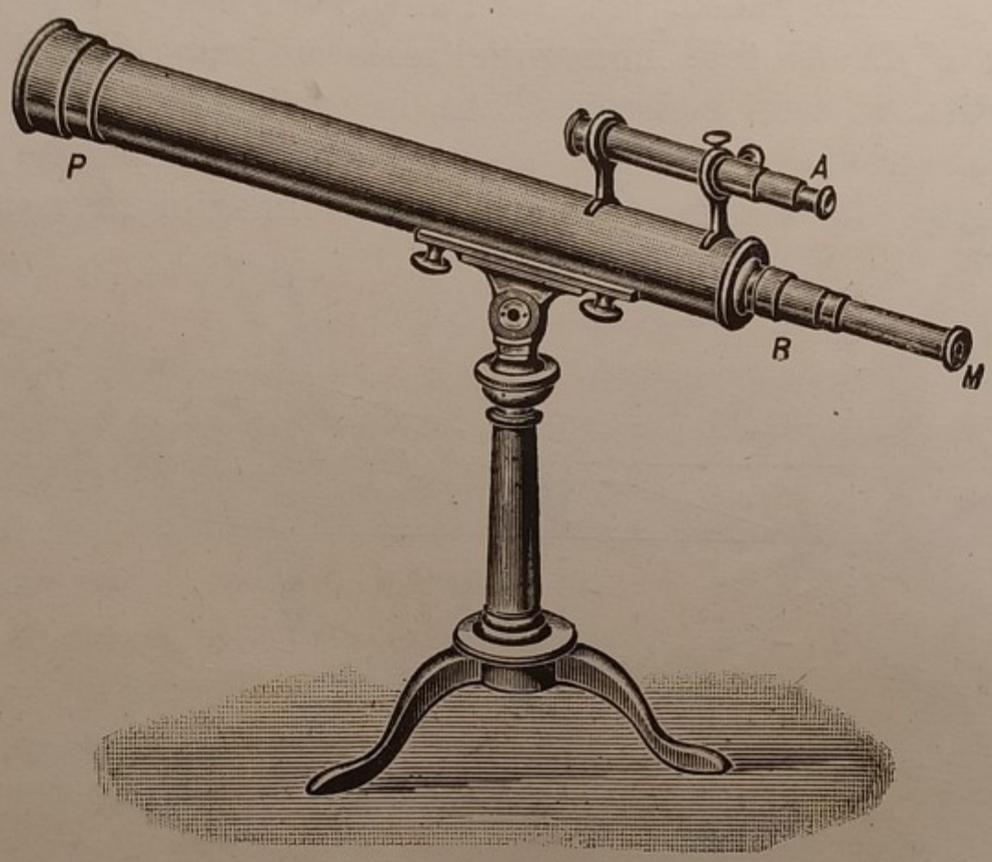


Fig. 318.

si diceva nel microscopio composto, viene anche in questo caso espresso in diametri. Si può dimostrare che tale ingrandimento è sensibilmente misurato anche dal rapporto $\frac{F}{f}$, dove F misura la distanza focale dell'obbiettivo, e f quella dell'oculare.

Per avere quindi forti ingrandimenti, non potendo ridurre, per particolari ragioni, la distanza focale dell'oculare, si usano obbiettivi a lungo fuoco, ciò che obbliga all'uso di lunghi tubi. L'obbiettivo del cannocchiale dell'Osservatorio astronomico di

Milano a Merate Brianza, ha il diametro di 487 mm., e la distanza focale di $6^m,85$. Malgrado tali modeste dimensioni — ci sono cannocchiali in America con obbiettivi del diametro superiore a 1 m. — il nostro grande astronomo Schiaparelli fece con esso delle scoperte che lo hanno reso immortale.

L'uso di obbiettivi a grande diametro è consigliato dalla necessità di utilizzare la massima quantità di luce emanata dall'oggetto, ciò che aumenta la luminosità dell'immagine. Una piccolissima stella può non essere visibile ad occhio nudo, perchè in questo caso la luce impressionante la retina è compresa entro il cono che ha per vertice la stella e per base la pupilla, mentre usando il cannocchiale, la luce che cade sulla retina è compresa entro il cono che avendo per vertice la stella ha per base l'obbiettivo. Ciò spiega perchè col cannocchiale riescono visibili le stelle anche di giorno, e di notte se ne vedono assai più che ad occhio nudo.

Coi grandi cannocchiali astronomici, dotati di forte ingrandimento, è difficile portare una stella nel campo dello strumento, per cui essi sono accompagnati da un piccolo cannocchiale astronomico *A* a piccolo ingrandimento detto *cannocchiale cercatore* (fig. 318), il cui asse è parallelo a quello del grande cannocchiale; l'astro che si vuol esaminare viene facilmente portato nel campo del cannocchiale cercatore, e allora l'oggetto è anche nel campo del cannocchiale più grande.

Oltre che all'esame degli astri, il cannocchiale astronomico, che è il più semplice di tutti i cannocchiali, è spesso unito ad apparecchi di misura usati in topografia, in geodesia, ecc.; in tutti i casi cioè, in cui sia necessario individuare una retta nello spazio.

Derivato dal cannocchiale astronomico è il *cannocchiale terrestre*, il quale è evidentemente obbligato di darci degli oggetti osservati immagini diritte. Il raddrizzamento di esse si ottiene coll'uso di una o due lenti convergenti, dette *raddrizzatrici*, poste dentro il cannocchiale poco al di là dall'oculare.

188. Cannocchiale di Galileo. — Il cannocchiale di Galileo ottiene il raddrizzamento dell'immagine con un sistema *divergente* che fa nello stesso tempo l'ufficio di oculare, ed è il più corto di tutti i cannocchiali. Esso è formato di un obbiettivo L a lungo fuoco (fig. 319), e di un oculare L_1 centrati sullo stesso asse all'estremità di un tubo metallico. L'obbiettivo darebbe in $A'B'$ l'immagine rovesciata, reale d'un oggetto AB, se i

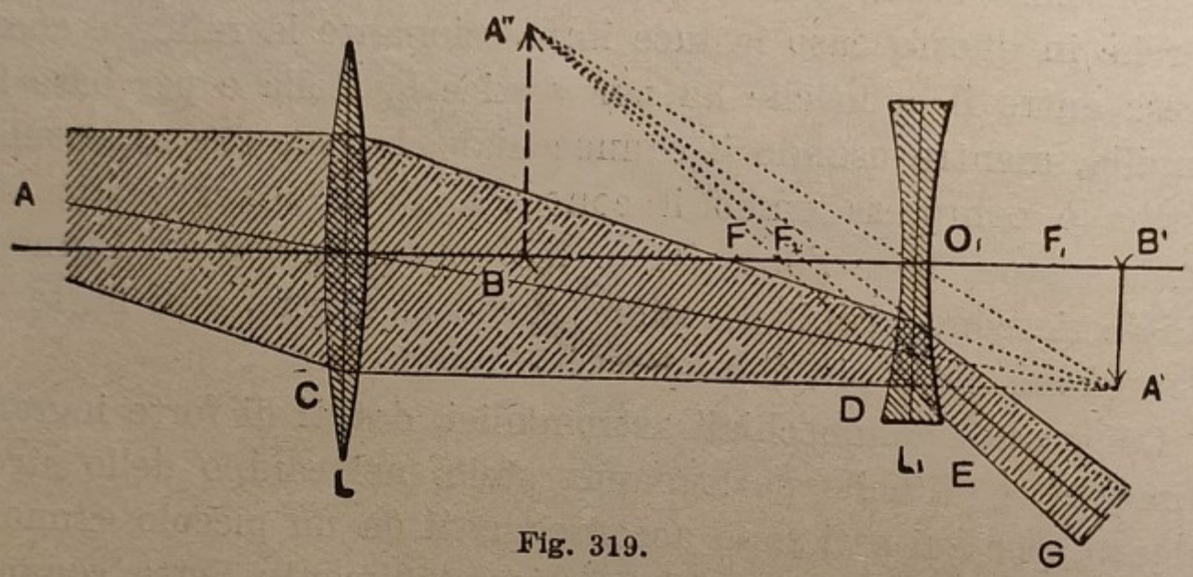


Fig. 319.

raggi convergenti in $A'B'$ non incontrassero la lente divergente L_1. Questa lente è posta ad una distanza da $A'B'$ superiore alla sua distanza focale O_1F_1.

Consideriamo un raggio CD che viene dall'obbiettivo inviato verso l'oculare parallelamente all'asse; tale raggio, se non esistesse l'oculare, passerebbe per A'; ma dall'oculare è rifratto secondo EG in modo che il suo prolungamento passa per il secondo fuoco F_2 dell'oculare stesso. L'intersezione A'' di questo prolungamento con l'asse secondario $A'O_1$ è l'immagine del punto A. Così l'occhio posto contro l'oculare vede in $A''B''$ un'immagine virtuale, ingrandita e rovesciata rispetto ad $A'B'$, cioè diritta rispetto all'oggetto.

La messa a fuoco si fa anche qui affondando più o meno il tubo che porta l'oculare nel tubo principale a cui è fissato

l'obbiettivo. D'ordinario l'ingrandimento del cannocchiale di Galileo non supera il 5.

I binoccoli da teatro sono formati di due cannocchiali di Galileo accoppiati per la visione binoculare.

189. Cannocchiale a prismi. — Questo cannocchiale è stato ideato nel 1850 dal maggiore piemontese del genio Porro, e presenta notevoli vantaggi sopra i tipi comuni. Il raddrizzamento dell'immagine è ottenuto con due prismi di vetro

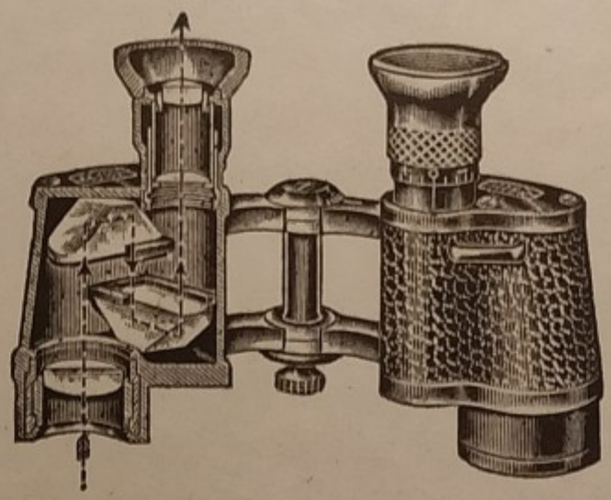


Fig. 320.

rettangoli, isosceli (fig. 320), disposti coi piani delle faccie ipotenuse paralleli e cogli spigoli degli angoli retti fra loro ortogonali. La disposizione però è tale che le faccie ipotenuse sono fra loro di fronte solo per metà, e quindi si hanno quattro riflessioni totali successive sulle faccie cateti, due per ogni prisma. Oltre a ciò il dispositivo del Porro pur realizzando un notevole ingrandimento — si costruiscono binoccoli a prismi con un ingrandimento 18 — consente anche una riduzione della lunghezza del cannocchiale per effetto del tortuoso cammino cui sono obbligati i raggi luminosi.

190. Telescopio. — Questo nome è riservato ai cannocchiali il cui obbiettivo è uno specchio concavo, anzichè una lente.

Sono stati perciò anche chiamati cannocchiali *catottrici* per differenza dei cannocchiali comuni che son detti *diottrici*.

Le difficoltà che fino a un secolo e mezzo addietro s'incontravano per la costruzione di lenti di notevoli dimensioni con la voluta perfezione, consigliarono gli Astronomi, sull'esempio di Newton, Grégory ed Herschel, di usare come obbiettivo uno specchio concavo.

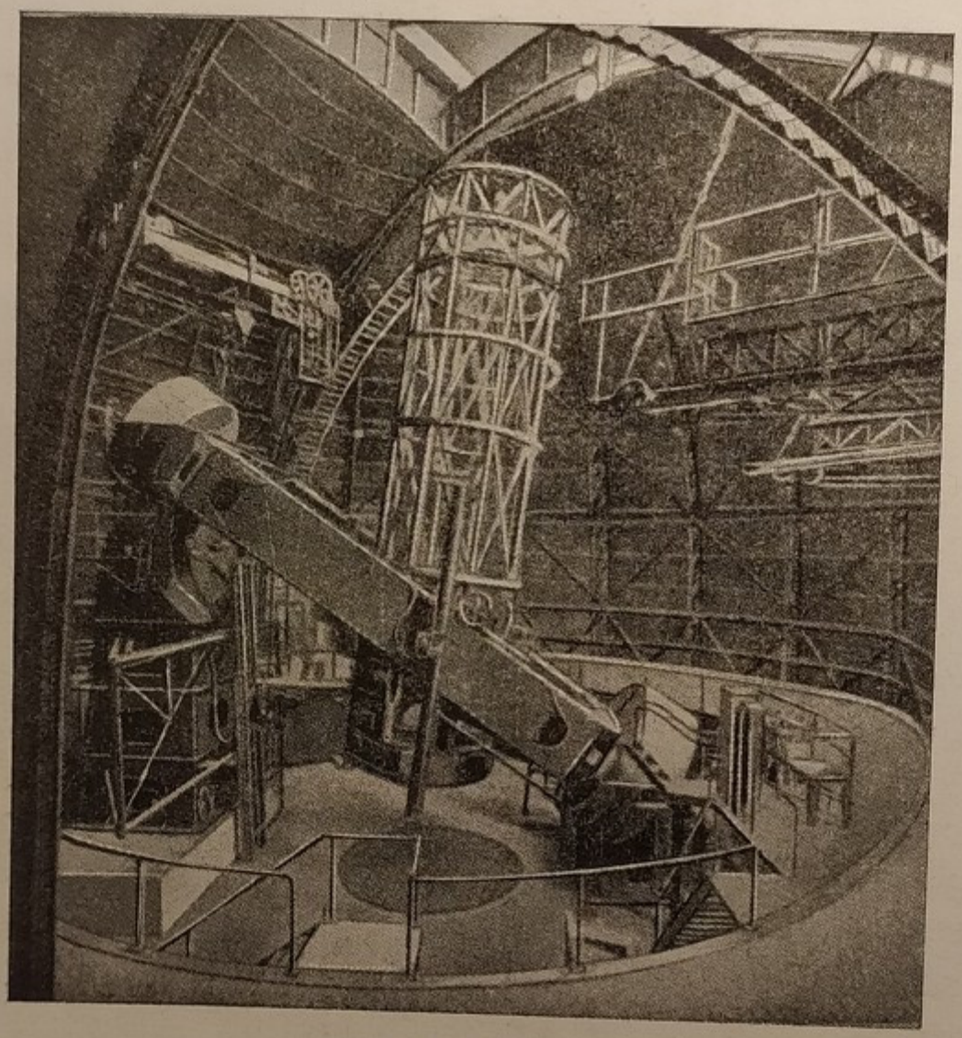


Fig 321.

Più tardi si dette la preferenza ai cannocchiali diottrici; in questi ultimi anni sono ritornati in onore i telescopi che coi loro grandi specchi che la tecnica moderna sa costruire alla perfezione, dànno risultati non raggiungibili coi più grandi cannocchiali.

Lo specchio concavo dà della stella che si vuol osservare una piccola immagine, ma molto brillante in causa della grande quantità di luce raccolta dallo specchio e tale immagine viene

osservata con un adatto oculare come si fa nel cannocchiale astronomico. La figura 321 riproduce il *Telescopio di Hooker*, il cui specchio ha un diametro di $2^m,50$ e che si trova nell'osservatorio del Monte Wilson in California.

Spettroscopia.

191. Modo di ottenere uno spettro puro. — Parlando della dispersione della luce (174) abbiamo eseguito l'esperienza fondamentale facendo penetrare nella stanza oscura la luce solare da un piccolo foro circolare praticato nell'imposta. Con tale disposizione però i diversi fascetti emergenti dal prisma, che corrispondono ai diversi colori, si sovrappongono in parte gli uni cogli altri, e i colori sono imperfettamente separati.

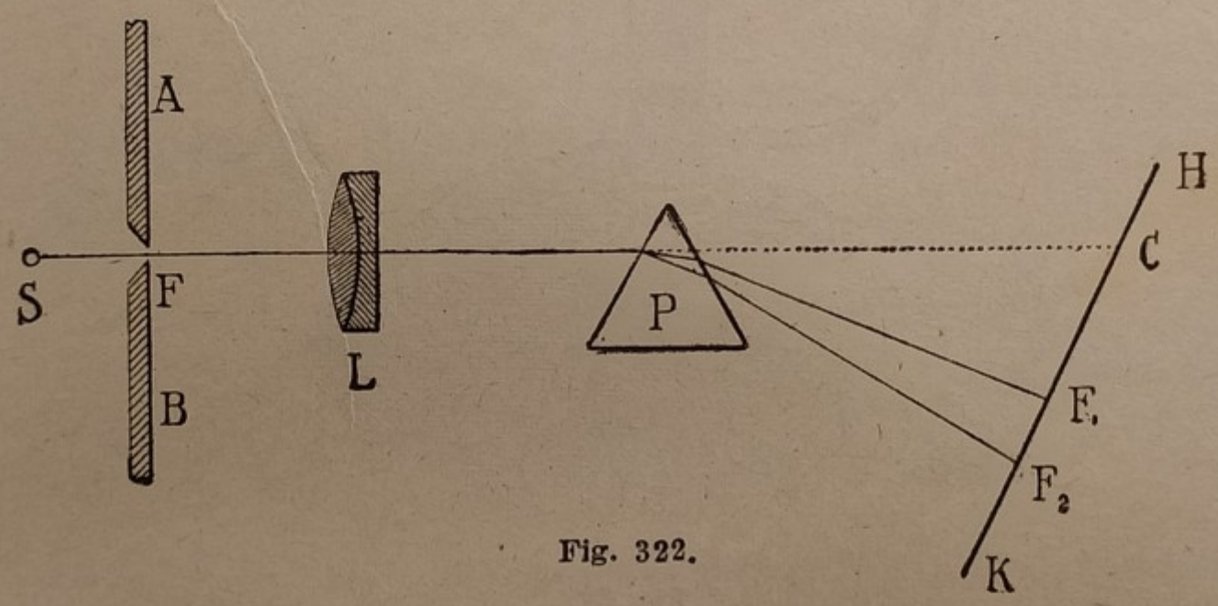


Fig. 322.

Si ottiene uno spettro *puro*, cioè a dire uno spettro in cui i colori riescono assai meglio divisi, con quest'altra disposizione. *F* è una stretta fessura, praticata in una imposta *AB*, a bordi paralleli e parallela allo spigolo rifrangente del prisma *P* (fig. 322). La sorgente luminosa, naturale o artificiale, è rappresentata da *S* e una lente acromatica *L* è posta in modo che, quando non c'è il prisma, proietta sopra uno schermo *HK*, posto di fronte, l'immagine *C* reale ingrandita della fenditura,

Messo a posto il prisma, ciascun raggio colorato formerà sullo schermo la rispettiva immagine della fenditura, e le diverse immagini saranno tanto meno parzialmente sovrapposte le une alle altre quanto più stretta sia la fenditura.

Si ottiene così lo spettro in F_1F_2 sullo schermo.

192. Spettroscopio. — Per uno studio accurato dello spettro solare e più ancora degli spettri dati da altre sorgenti lumi-

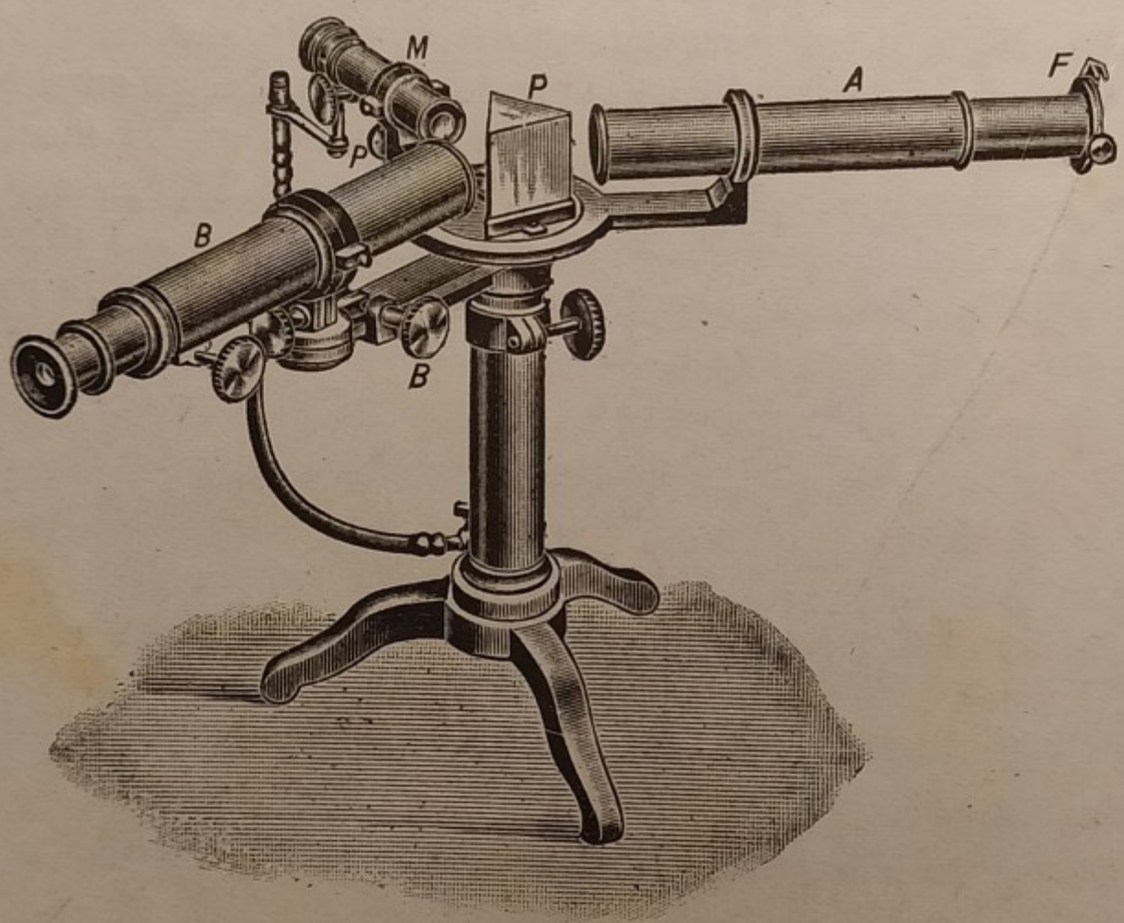


Fig. 323.

nose è conveniente usare uno speciale apparecchio detto *spettroscopio*.

Esso si compone essenzialmente di tre parti: di un *collimatore*, di un *prisma* e di un *cannocchiale*. Prospetticamente l'apparecchio è illustrato dalla figura 323.

Il collimatore A (fig. 324) è un tubo munito di lente convergente acromatica verso il prisma e di una fenditura F

portata da un tubo scorrevole all'estremità opposta; fuori della fenditura F, in S, si pone la sorgente che si vuol esaminare. Essendo la fenditura posta nel fuoco della lente del collimatore, i raggi cadono sul prisma P paralleli, escono divergenti e penetrano in un cannocchiale astronomico B. L'obbiettivo di questo dà un'immagine reale dello spettro, ma tale immagine aerea viene osservata mediante l'oculare, che ne dà un'immagine virtuale.

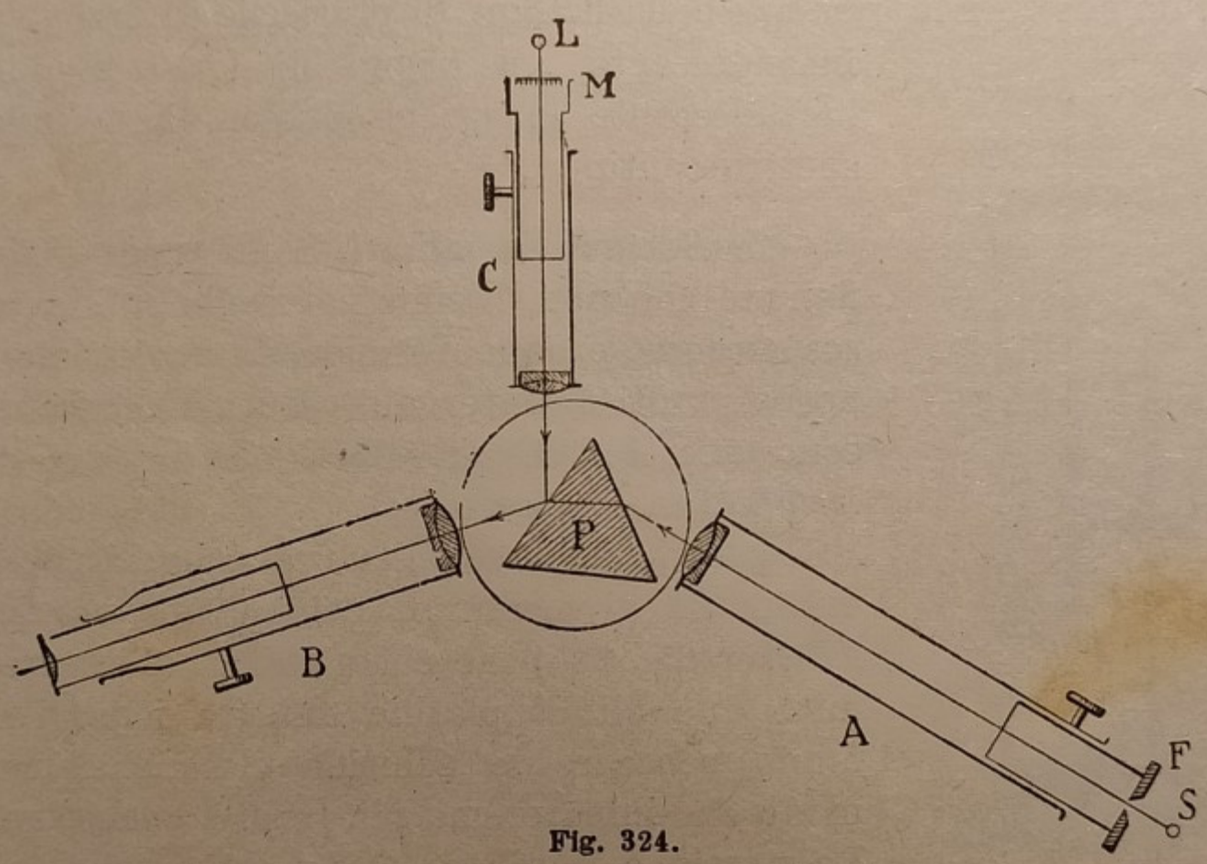


Fig. 324.

Insieme ai raggi provenienti dal prisma, il cannocchiale riceve anche quelli che provengono dal tubo C detto *micrometro*, e che si riflettono sulla faccia del prisma da cui escono i raggi dello spettro. Il micrometro porta all'estremo M una finissima scala graduata con divisioni trasparenti su fondo opaco, illuminata dalla lampada L, dimodochè l'osservatore che guarda nel cannocchiale, vede ad un tempo l'una sopra l'altra l'immagine dello spettro e quella della scala.

Il micrometro, come si vedrà, serve a localizzare le eventuali linee che possono aversi nello spettro da esaminare.

193. Differenti specie di spettri. — Ci limiteremo a distinguere tre tipi di spettri:

1° *Spettri continui.* Si presentano con una successione di colori senza nessuna soluzione di continuità; e sono gli spettri dei *solidi* e dei *liquidi incandescenti.*

Le punte roventi dei carboni delle lampade ad arco, i filamenti delle lampade a incandescenza dànno spettri continui; le comuni lampade a petrolio, ad olio, ad acetilene, che son luminose per la presenza nella fiamma di particelle di carbonio incandescente, un bagno di ferro liquido incandescente in un crogiuolo, dànno uno spettro continuo.

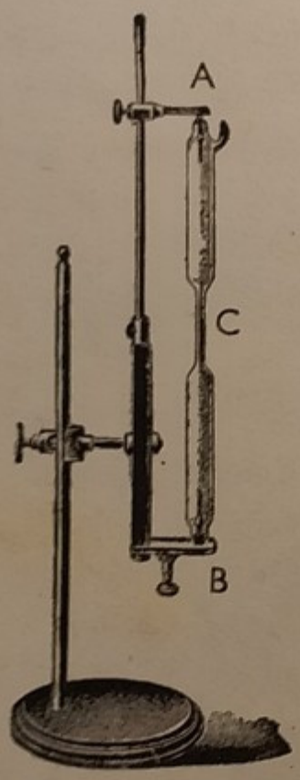


Fig. 325.

2° *Spettri discontinui.* Sono prodotti da fiamme che non hanno particelle solide in sospensione, e sono formati da raggi luminosi separati da intervalli oscuri. Tali spettri sono offerti dai *gas rarefatti* e dai *vapori metallici* incandescenti.

Il gas viene chiuso, alla pressione di pochi millimetri di mercurio, dentro un *tubo di Plücker* (fig. 325) che porta saldati alle estremità due fili di platino *AB*, fra i quali si fanno scoccare le scintille elettriche, nel modo che impareremo più tardi a conoscere. La porzione capillare *C* del tubo, risplendente di luce abbastanza viva, viene posta davanti alla fenditura dello spettroscopio. Coll'*idrogeno* si ottengono tre linee vivaci, *rossa*, *verde-azzurra*, *turchino-violetta* (v. n. 3 della tavola fuori testo).

Per lo studio dei vapori metallici, si pone davanti al collimatore una fiamma Bunsen, che è ben calda, ma pochissimo luminosa e perciò non offre uno spettro visibile. Nella fiamma s'introduce una goccia di soluzione di un sale metallico volatile sostenuta in un piccolo occhiello con cui termina un filo di platino. Il sale si decompone e dà dei vapori metallici; lo spettro è formato di linee luminose che sono identiche per uno stesso

metallo, indipendentemente dalla natura del suo sale, e *caratterizzano l'elemento metallico*. Le linee dei diversi metalli sono diverse per numero, per colore e quindi diversamente poste sulla scala del micrometro.

Il *sodio* dà una linea *gialla*, che può facilmente vedersi sdoppiata restringendo assai la fenditura del collimatore (v. n. 2 della tavola fuori testo), il *tallio* una linea *verde*, il *litio* una linea *rosso-viva* e una *giallo-aranciata* più pallida.

3° *Spettri a righe nere.* Lo spettro solare appartiene a questa categoria. Tale è anche lo spettro della Luna e dei pianeti, che mandano luce solare riflessa. Come abbiano origine tali spettri vedremo fra poco.

194. Analisi spettrale. — Una mescolanza di sali di vari metalli offre uno spettro che contiene tutte le righe dei metalli osservati separatamente. E poichè basta la presenza nella fiamma anche di una minima quantità d'un sale perchè si riveli lo spettro caratteristico dell'elemento metallico, si comprende che il processo descritto rappresenta un metodo di analisi chimica della massima importanza. Basta introdurre nella fiamma Bunsen una quantità di sodio eguale a $0^{mg},0000003$ per avere subito la riga gialla caratteristica. E siccome il pulviscolo atmosferico contiene qualche traccia di sodio, basta sollevare un po' di polvere vicino alla fiamma Bunsen per avvertirne la presenza; perciò durante tali osservazioni è difficile eliminare la riga del sodio.

L'impiego dell'analisi spettrale ha permesso di scoprire un certo numero di corpi, particolarmente metalli, che si trovano in natura disseminati nelle roccie, nell'acqua o nell'aria in piccolissima quantità. Citeremo fra questi il *rubidio*, il *cesio*, il *tallio*, l'*indio*, il *gallio*, che sono stati isolati dopo che lo spettroscopio li aveva rivelati. Anche il *radio* ha uno spettro particolare, e così i nuovi gas *argon*, *neon*, *elio*, ecc.

195. Assorbimento delle radiazioni luminose. — Per osservare il fenomeno s'interpone la sostanza assorbente fra la fenditura del collimatore di uno spettroscopio e una sorgente

luminosa a spettro continuo, quale può essere la fiamma dell'acetilene, il cratere positivo di una lampada ad arco, una forte lampada ad incandescenza a globo smerigliato.

Le sostanze *incolori* lasciano passare in egual proporzione tutti i colori dello spettro.

Le sostanze *colorate* assorbono più o meno certi raggi e lo spettro dei raggi che esse lasciano passare manca dei raggi assorbiti. Poche sono le sostanze trasparenti veramente *monocromatiche*, cioè che lascino passare solo raggi di una regione ristretta dello spettro.

E siccome l'assorbimento non aumenta in generale col crescere dello spessore nella stessa proporzione per i diversi raggi, la tinta della luce trasmessa *varia con lo spessore*. Così l'acqua, che è sensibilmente incolora per piccoli spessori, apparisce bleu o verde sotto spessore alquanto grande.

Certi spettri di assorbimento sono solcati da bande nere molto numerose; così si comportano il perossido di azoto, il vapore d'iodio, il vapor d'acqua; le bande crescono di numero e di larghezza col crescere dello spessore del corpo assorbente.

Anche gli spettri di assorbimento possono avere una notevole importanza per l'analisi.

196. Spettro solare. — Osservata allo spettroscopio, la luce solare, diretta o diffusa non importa, presenta uno spettro discontinuo, con numerose e fini righe nere irregolarmente distribuite, parallele alla fenditura, dette *righe di Fraunhofer*, ottico di Monaco di Baviera, che le scoperse verso il 1815.

Il Fraunhofer ne potè contare da 500 a 600, ma per orizzontarsi in mezzo a tal confusione ne fissò 8 fra le più appariscenti e le designò colle prime otto lettere dell'alfabeto da *A* ad *H* (v. n. 1 della tavola fuori testo).

A, *B*, *C* sono nel rosso, *D* fra l'aranciato e il giallo, *E* fra il giallo e il verde, *F* nel verde, *G* tra l'azzurro e l'indaco, *H* all'estremo violetto. Coi mezzi attuali si contano più di 20 mila linee assai fini.

Notisi che per una stessa sostanza rifrangente ciascuna riga occupa sempre la stessa posizione nello spettro solare e corrisponde sempre a uno stesso indice di rifrazione.

L'intensità *luminosa* è variabile nelle diverse regioni dello spettro; verso la metà del giallo e precisamente fra le linee *D* ed *E* si ha la maggiore luminosità.

La spiegazione delle righe nere dello spettro solare è data da una esperienza, dovuta al Fizeau e secondo altri ai fondatori dell'analisi spettroscopica Sigg. Kirchoff e Bunsen, detta *esperienza dell'inversione dello spettro.*

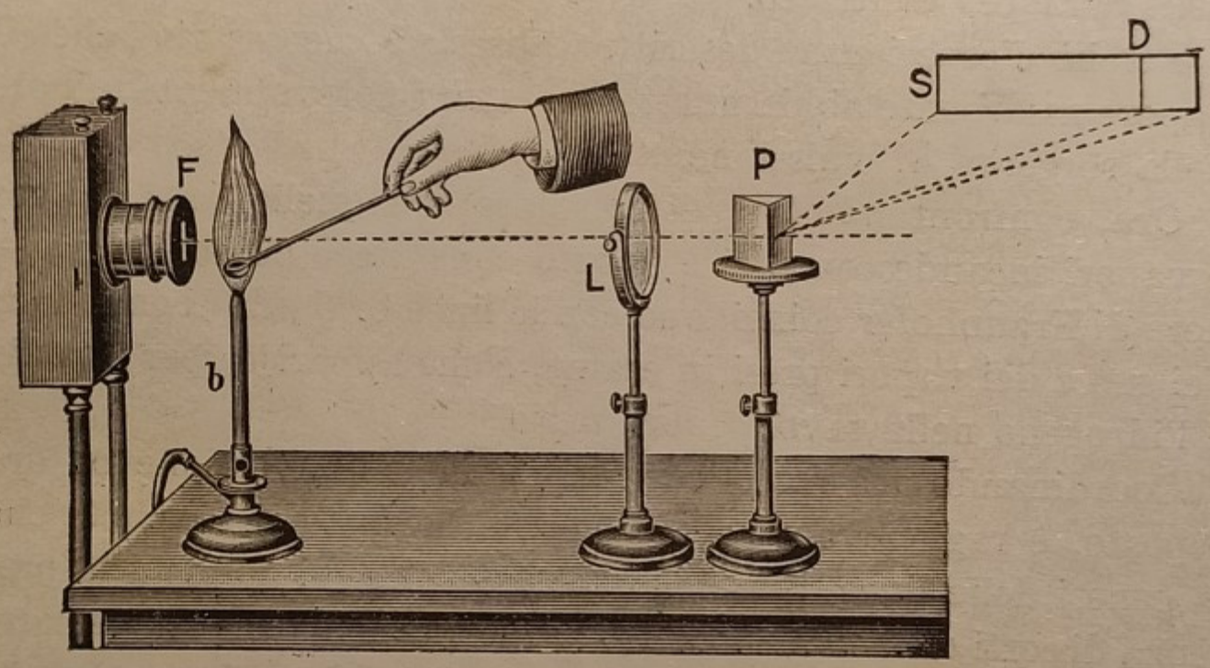


Fig. 326.

Volendo mostrare il fenomeno a un uditorio si procede così. All'apertura di una lanterna di proiezione, illuminata con lampada ad arco, si adatta una fenditura *F* verticale e fuori di essa un becco Bunsen *b* che arde con fiamma non luminosa (fig. 326). Con una lente convergente acromatica *L* e un prisma *P* cogli spigoli verticali, si proietta lo spettro continuo sopra uno schermo *S*. Se allora s'introduce nella fiamma Bunsen un piccolo cucchiaio di platino contenente un frammento di sodio, si osserva che sullo spettro, prima continuo, si disegna una linea nera *D*. Tale linea occupa precisamente il posto che occuperebbe la linea brillante che si ha nello spettro di emissione del sodio stesso.

Ciò mostra che il vapore di sodio assorbe le stesse radiazioni che è capace di emettere e quelle soltanto: tutti i raggi emanati dalla lampada ad arco passano indisturbati attraverso il vapore di sodio, il quale assorbe soltanto quei pochi raggi che sono identici a quelli che esso emette. Il fenomeno si ripete per tutti gli altri elementi.

La linea di assorbimento del sodio, che noi abbiamo detta nera, è un po' luminosa; essa infatti possiede la luce che avrebbe da sola la riga brillante del sodio; ma perchè essa si trova compresa tra due regioni collaterali molto brillanti apparisce nera per contrasto.

Perchè l'esperienza descritta riesca, è necessario che il vapore assorbente abbia una temperatura notevolmente minore della sorgente di emissione.

Ora, confrontando lo spettro solare con quello dato dai gas e vapori incandescenti, si è potuto constatare che molte righe nere di Fraunhofer coincidono con le linee brillanti di emissione dei gas e dei vapori presi in esame, come apparisce per il sodio e l'idrogeno nella tavola fuori testo.

Coordinando tal fatto col fenomeno dell'inversione or ora esposto, è ragionevole pensare, come ha fatto il Kirchoff, che la genesi delle linee nere dello spettro solare si debba alla presenza di certi elementi allo stato aeriforme nell'atmosfera solare.

Il Sole sarebbe costituito di un nucleo, forse in uno stato fra il liquido e il gassoso, circondato da un'atmosfera incandescente, detta *fotosfera*, la quale a sua volta è circondata da un involucro esterno, la *cromosfera*. La fotosfera ha una temperatura assai elevata, di guisa che, se non esistesse la cromosfera, si avrebbe uno spettro continuo. Ma gli aeriformi della cromosfera, che ha temperatura inferiore alla fotosfera, operano l'assorbimento, con un comportamento identico a quello del sodio nell'esperienza sopra descritta. Quindi lo spettro diventa discontinuo e dalla coincidenza delle diverse linee nere con quelle brillanti degli spettri di emissione dei vari elementi, si può stabilire quali elementi esistono nella cromosfera solare.

Così, oltre il sodio, in questa ci sarebbero anche l'idrogeno, il ferro, il calcio, il bario, il magnesio, lo zinco, il nichel, l'elio, ecc.

La mancanza di coincidenza fra le linee nere dello spettro solare e le linee brillanti degli spettri del litio, dello stronzio, dell'alluminio, dell'argento e dell'oro, attesterebbe l'assenza di questi elementi dalla cromosfera solare.

Stando a quello che precede, la cromosfera deve emettere gli stessi raggi che assorbe, e però il suo spettro di emissione deve presentare delle linee brillanti al posto delle linee nere dello spettro solare. Ciò avviene in realtà; perchè, se durante un'eclisse totale di Sole si osserva direttamente con un cannocchiale munito di spettroscopio la luce della corona solare, si riscontrano nello spettro delle linee brillanti dovute specialmente all'idrogeno e al magnesio. E si riscontrò anche, tempo addietro, una riga brillante nuova, che fu attribuita a un elemento sconosciuto, l'*elio*, elemento che fu poi riscontrato e isolato sulla Terra. Noi non possiamo qui che toccare appena le applicazioni alla Fisica celeste della spettroscopia, che ci ha fornito delle preziose nozioni sulla costituzione degli astri.

Per limitarci al Sole, basta citare il fatto delle *protuberanze solari* osservabili appunto collo spettroscopio, che sarebbero formidabili esplosioni o fiammate di idrogeno che si elevano ad altezze che possono raggiungere i 500 mila chilometri.

I pianeti presentano lo spettro stesso del Sole, salvo la presenza di alcune linee nere dovute all'assorbimento operato dal vapor acqueo esistente nella atmosfera particolarmente di Venere, Marte ed Urano.

Lo spettro della Luna non presenta tali linee, ciò che confermerebbe l'assenza di qualsiasi atmosfera.

Le stelle fisse dànno pure spettri di assorbimento, ma diversi da quello solare, ciò che prova che esse sono di per sè luminose. Le righe dell'idrogeno si mostrano negli spettri di tutte le stelle fisse; dopo l'idrogeno gli elementi che s'incontrano più spesso sono il sodio, il ferro e il magnesio.

Per finire, diremo che, all'infuori dell'analisi spettrale e dello studio della costituzione degli astri, la spettroscopia ha altre importanti applicazioni. Citeremo fra tutte l'analisi di macchie di sangue su legno, biancheria, ecc.; la previsione della pioggia in seguito all'apparizione nello spettro solare di

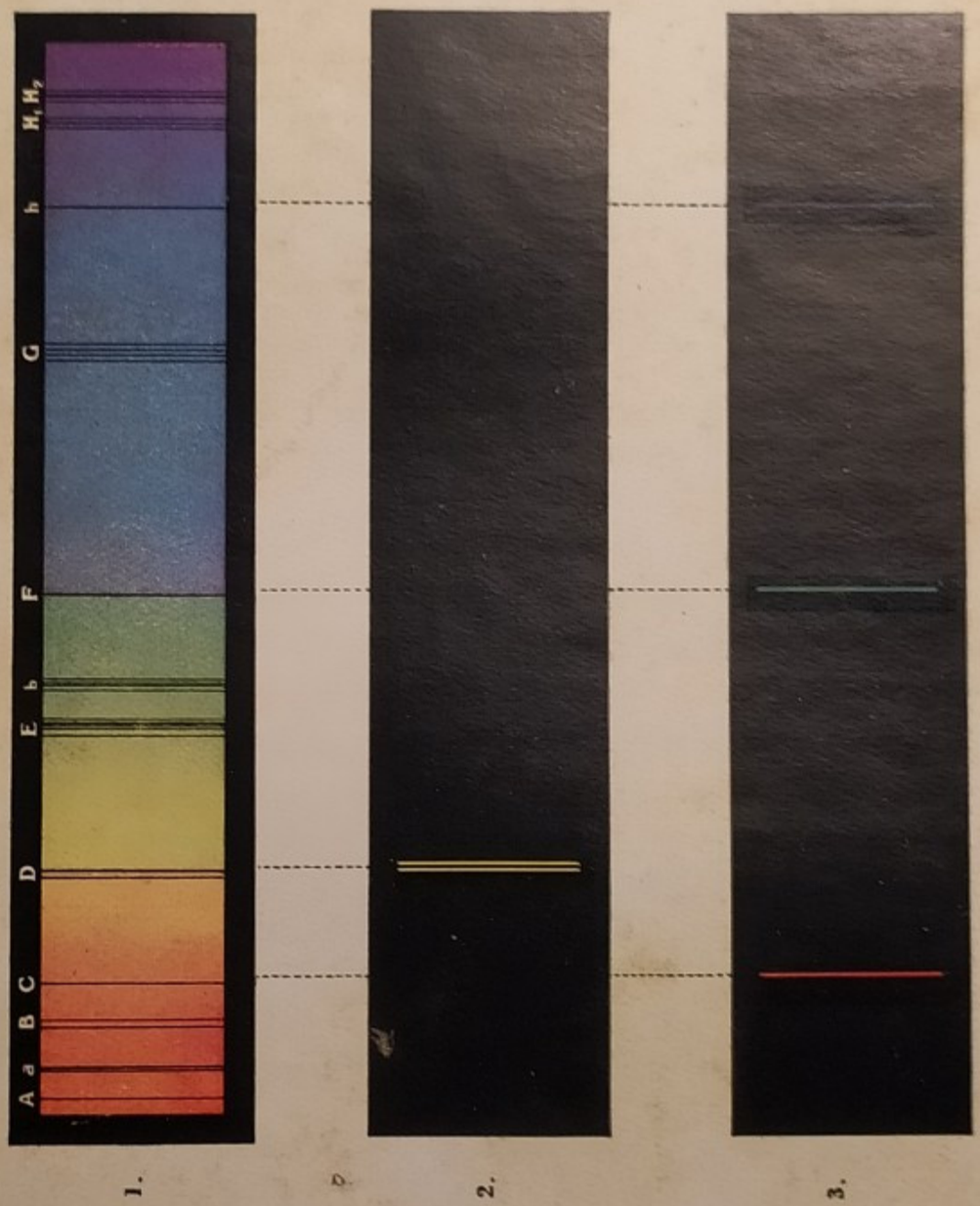
certe righe nere dovute all'assorbimento operato dal vapor d'acqua atmosferico; la determinazione approssimativa delle alte temperature in metallurgia.

197. Radiazioni non visibili. — Ricorrendo a particolari dispositivi si può facilmente provare che al di fuori dello spettro solare visibile, sia dalla parte del rosso che dalla parte del violetto, esistono dei raggi o radiazioni *invisibili*. I raggi *ultrarossi* sono raggi calorifici, ma la loro esistenza può essere messa in vista solo con apparecchi termoscopici di alta sensibilità. Serve bene allo scopo il *bolometro*, apparecchio fondato su principî di Elettricità che qui non possono essere spiegati, nel quale il riscaldamento anche minimo di un sottile filo di platino è rivelato in modo evidentissimo. Con tale apparecchio si constata che l'indicazione termica, quasi nulla nel violetto, va crescendo verso il rosso e continua anche al di là, attestando l'esistenza di raggi costituenti il così detto *spettro infra* o *citrarosso*.

D'altra parte a tutti è noto che i raggi del Sole sono capaci di notevoli azioni chimiche; essi infatti determinano la combinazione del cloro e dell'idrogeno, trasformano il fosforo bianco in fosforo rosso, decompongono i sali d'argento, ecc. A tutti è inoltre noto il meccanismo della funzione clorofilliana che avviene sotto l'azione della luce e del calore solare. Il cloruro di argento in particolar modo da bianco diventa color ardesia, per produzione di argento allo stato di estrema suddivisione.

Per provare quali sono i raggi dello spettro solare dotati di azione chimica più efficace, basta raccogliere lo spettro sopra una comune lastra fotografica; sviluppatala, si scorge che essa non è impressionata, o lo è pochissimo, dai raggi rossi, aranciati e gialli; l'impressione si ha dal verde fino al violetto, ed anche in una regione posta al di là del violetto, estesa notevolmente, dove l'occhio non percepisce alcuna luce. Questa regione è detta *spettro ultravioletto*, e anche questi raggi soggiaciono alle stesse leggi degli altri.

I raggi ultravioletti hanno anche la proprietà di facilitare a scarica dei corpi elettrizzati, e di destare la *fluorescenza* n certe sostanze. Ci sono dei corpi che investiti da particolari



1. Spettro solare — 2. Spettro del sodio — 3. Spettro dell'idrogeno

radiazioni diventano luminosi e brillano di luce che ha spesso colore diverso da quella che li investe. Sono tali le soluzioni di solfato di chinina, di fluorescina, e alcune qualità di petrolio impuro. Queste sostanze presentano per trasparenza certe tinte, se pur non sono incolori, come la prima delle soluzioni indicate, ma per diffusione si presentano colorate in modo diverso. Così la soluzione di solfato di chinina diffonde luce azzurra; la fluorescina apparisce lattiginosa con una bella tinta verde, mentre per trasparenza apparisce giallo-cupa. Le sostanze che presentano tale comportamento si dicono *fluorescenti*.

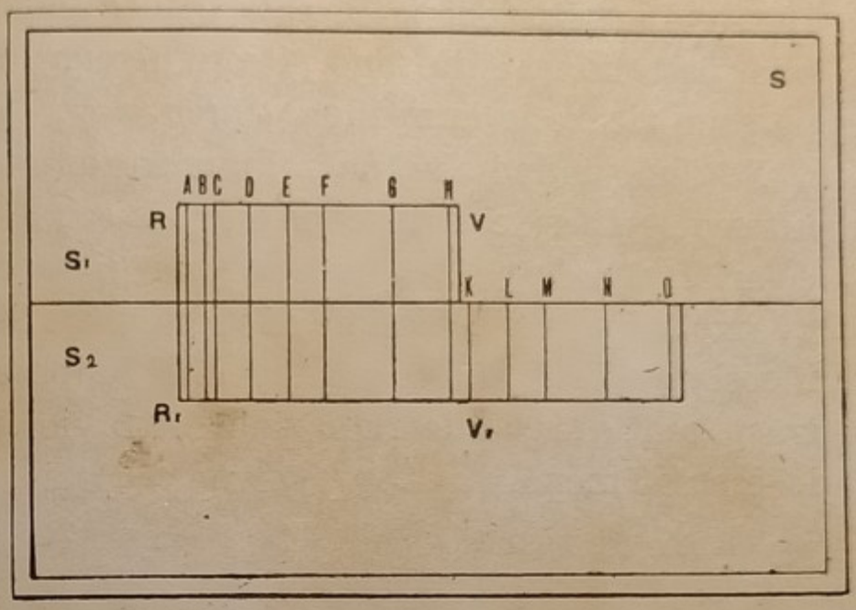


Fig. 327.

Viene ora spontanea la domanda: quali sono le radiazioni che eccitano il fenomeno in maggior grado? La risposta riesce abbastanza facile, ricorrendo alla esperienza che segue.

S è uno schermo al platino-cianuro di bario, lo stesso che si usa per esperienze sui raggi *X* (fig. 327). La metà superiore dello schermo si copre con una carta bianca, l'altra metà si lascia scoperta e vi si proietta sopra lo spettro solare, sì che metà cada sulla carta bianca e l'altra metà sullo schermo scoperto. Sulla carta si osserva lo spettro ordinario *RV*, ma sul platino-cianuro lo spettro apparisce più lungo di quello ordinario e si osserva che la fluorescenza è eccitata dalle stesse radiazioni che hanno azione chimica, cioè dalle più rifrangibili dello spettro visibile e dalle ultraviolette. Anche nello spettro solare ultravioletto si hanno linee nere, designate colle lettere *K*, *L*, *M*... Certe sostanze poi rimangono lumi-

nose anche dopo cessate le radiazioni che le hanno eccitate; tali sostanze si dicono *fosforescenti*. Interessanti fenomeni di fluorescenza e di fosforescenza verranno esposti nella Elettricità.

Anche le luci artificiali possiedono la loro parte più o meno estesa di radiazioni infrarosse e ultraviolette; le lampade ad olio, petrolio e simili sono povere di raggi ultravioletti, mentre ne sono ricche le lampade ad arco.

Notiamo infine che, data l'importanza terapeutica dei raggi ultravioletti, si costruiscono oggi a scopo medico delle particolari lampade elettriche a vapori di mercurio, con bulbo in quarzo soffiato, ricchissime di raggi ultravioletti, che realizzano il così detto *sole di alta montagna*. Il bulbo e in quarzo, sostanza trasparentissima alle radiazioni ultraviolette, mentre il vetro lo è assai meno.

198. Fotografia. — Colla fotografia si riproduce e si fissa l'immagine degli oggetti.

Il comune processo fotografico si fonda sulla proprietà della luce di decomporre i sali di argento, e già si accennò al fatto nel paragrafo precedente.

La prima operazione alla quale procede il fotografo è la *messa a fuoco* dell'oggetto, che consiste nel disporre la macchina fotografica davanti all'oggetto in modo che l'immagine di questo si formi netta sul vetro smerigliato che sta di fronte all'obbiettivo.

In seguito si sostituisce al vetro smerigliato una *lastra fotografica*, che è una lastra di vetro o di celluloide, una faccia della quale è ricoperta da un sottile strato di gelatina che contiene in sospensione dei minuti granuli di bromuro di argento e talora di altri sali pure di argento.

Tali lastre si trovano in commercio belle e preparate, chiuse in scatole al riparo assoluto della luce. Nel camerino oscuro, debolmente illuminato da luce rosso-rubino — la luce rossa ha un'azione chimica estremamente debole (197) — le lastre vengono tolte dalla loro scatola e poste in appositi telai di legno o di metallo, opachi, muniti di parete scorrevole a saracinesca,

verso la quale è volta la faccia sensibile della lastra. Il telaio viene sostituito al vetro smerigliato, di guisa che, sollevata la saracinesca e aperto l'obbiettivo, che dopo la messa a fuoco era stato chiuso, l'immagine si forma ora sullo strato sensibile della lastra.

L'*esposizione* può durare un tempo variabilissimo; molti minuti per oggetti fissi e poco illuminati, quali quadri, soggetti architettonici interni e simili; pochi secondi e spesso anche piccolissime frazioni di secondo per oggetti in movimento molto illuminati, come scene all'aperto, cavalli in corsa, ecc.

La lastra rinchiusa nel suo telaio viene riportata nel camerino oscuro. Osservandola, nulla affatto vi apparisce; l'azione della luce non è affatto visibile; ma un'alterazione è avvenuta; infatti, immergendo la lastra in un adatto *bagno di sviluppo*, l'immagine più o meno lentamente si rivela.

Il bagno di sviluppo è una soluzione riduttrice; in essa la lastra annerisce più o meno nelle sue diverse parti, a seconda dell'intensità e della qualità della luce che le ha colpite. Tale annerimento è dovuto alla formazione di una polvere tenuissima di argento che si libera dal bromuro.

Le regioni invece non colpite dalla luce restano inalterate; si ha così una *negativa* dell'oggetto, nella quale cioè i chiaroscuri sono invertiti (fig. 328).

Dopo di ciò la lastra viene immersa in una soluzione di iposolfito sodico, che discioglie il bromuro di argento non ancora ridotto, e così non rimane sulla lastra che uno strato di gelatina e qua e là più o meno dell'argento ridotto inalterabile. La lastra così viene *fissata*. La negativa va a tal punto abbondantemente lavata, per asportarne fin l'ultima traccia di iposolfito che col tempo produrrebbe delle macchie gialle, e asciugata al riparo della polvere.

Colla negativa si procede alla stampa delle positive, che vengono d'ordinario ottenute su carta. Questa carta si trova bella e pronta, in buste al riparo della luce, di specie differentissime a seconda delle diverse esigenze e gusti dei fotografi. A due tipi però si possono ridurre le comuni carte, il tipo ad *annerimento diretto* e il tipo a *sviluppo*. Le carte ad annerimento diretto sono a base di cloruro di argento, le altre di bromuro.

Nell'uno e nell'altro caso si distende il foglio di carta colla superficie sensibile contro la faccia gelatinata della negativa e lo si immobilizza premendo l'uno contro l'altra mediante un apposito telaio munito di vetro, la negativa contro il vetro del telaio. Questo viene allora esposto alla luce del giorno o artificiale, secondo i casi; la luce traversa la negativa nelle

Fig. 328. — Negativa.

Fot. Ecclesia.

Fig. 329. — Positiva.

parti trasparenti e produce la sua azione sulla carta sottostante, mentre non produce azione sulle regioni della carta che stanno sotto a quelle opache della negativa. Se la carta è ad annerimento diretto si ha senz'altro l'immagine e si sospende l'esposizione quando essa è ben modellata; se si tratta di carta a sviluppo il tempo di esposizione giova determinarlo con prove preliminari e l'immagine si rivela con bagni di sviluppo come quelli delle lastre.

Le prove ottenute coll'una o coll'altra specie di carta vanno infine fissate all'iposolfito. Così si ottiene la *positiva*, nella quale i chiaro-scuri si presentano nell'ordine di quelli dell'oggetto (fig. 329).

Talora le positive si ottengono su lastre di vetro; ciò si fa quando devono servire per la lanterna di proiezione. Anche le stereoscopie sono spesso di tal natura; le positive su vetro si dicono anche *diapositive*.

Le pellicole che si proiettano col cinematografo sono diapositive su celluloide.

199. Natura della luce. — Le ipotesi sulla natura della luce hanno subìto durante la loro evoluzione dei successivi cambiamenti. Fino ad una certa epoca le opinioni dei Fisici rimasero divise fra due ipotesi: quella corpuscolare, detta anche della *emissione*, di Newton, e quella *ondulatoria*, proposta da Huygens.

L'ipotesi della emissione ammette che la luce sia dovuta al fatto che i corpi luminosi proiettano in tutte le direzioni, con grandissima velocità, dei corpuscoli infinitamente piccoli, imponderabili, che colpendo l'occhio vi destano le sensazioni visive e colpendo uno specchio vi si riflettono, come avviene delle palle del bigliardo che colpiscono le sponde.

Secondo l'ipotesi ondulatoria nel corpo luminoso si compiono dei movimenti vibratori, che scuotono le particelle di un mezzo tenuissimo, perfettamente elastico, l'*etere cosmico*, che dovrebbe compenetrare tutti i corpi ordinari, e riempire tutti gli spazi interplanetari e intersiderali, attraverso i quali giunge a noi la luce del Sole e degli astri. Il meccanismo del fenomeno è in sostanza quello della propagazione del suono, colla differenza che le onde sonore si propagano nei mezzi elastici ordinari, aria, acqua e simili, e quelle luminose nell'etere; le onde sonore nell'aria hanno una velocità di propagazione di 340 metri al secondo, quelle della luce nel vuoto una velocità di 300.000 Km. al secondo.

La ipotesi dell'emissione si sostenne a lungo principalmente per la grande autorità del Newton, ma la scoperta di molti fatti malamente o non affatto spiegabili con quella ipotesi, fece spostare l'opinione degli Scienziati verso quella delle ondulazioni, che più facilmente e meglio poteva dare la spiegazione dei fenomeni scoperti.

L'argomento definitivo in favore della ipotesi ondulatoria,

si ebbe però solo quando il Foucault riuscì a misurare la velocità della luce nell'acqua e nel vetro, risultandone per questi mezzi una velocità minore che per l'aria.

Secondo l'ipotesi delle ondulazioni la velocità della luce deve essere tanto minore quanto più rifrangente è il mezzo in cui si propaga, e precisamente il rapporto fra la velocità di propagazione nel vuoto e in un determinato mezzo è eguale all'indice assoluto di rifrazione di codesto mezzo. Così l'indice assoluto dell'acqua essendo $^4/_3$, la velocità della luce nell'acqua è i $^3/_4$ di quella nel vuoto: in questo mezzo essendo 300.000 Km. al secondo, nell'acqua deve essere $^3/_4 \times 300.000 = 225.000$ Km. al secondo, come ha trovato sperimentalmente il Foucault. Secondo l'ipotesi della emissione invece le cose dovrebbero andare in modo opposto.

Da pochi anni tuttavia le idee sulla natura delle onde luminose si sono alquanto modificate, poichè si ammette che le vibrazioni che costituiscono la luce non siano vibrazioni delle particelle dell'etere, ma si tratti di vibrazioni elettromagnetiche come quelle usate nelle radiocomunicazioni e delle quali si parlerà in uno speciale capitolo nella Elettrologia. Queste onde si propagano nel vuoto, per modo che è superfluo ammettere l'esistenza dell'etere. Però possiamo continuare a parlare di vibrazioni luminose come di vibrazioni delle particelle dell'etere; infatti la maggior parte dei fenomeni luminosi si può interpretare secondo questa concezione, che ha il vantaggio di fornirci un'idea della propagazione delle onde luminose più accessibile all'intuito.

Dicevamo poco sopra che il meccanismo della propagazione della luce si può ritenere analogo a quello della propagazione del suono; una differenza notevole però sta in questo che, mentre le molecole dell'aria che trasmette il suono vibrano nella direzione secondo cui avviene la propagazione delle onde, cioè *longitudinalmente*, le vibrazioni nelle onde luminose sono *trasversali*, vale a dire le vibrazioni delle particelle dell'etere avvengono in direzione perpendicolare ai raggi luminosi.

200. Frequenza e lunghezza d'onda di una radiazione semplice. — La frequenza e la lunghezza d'onda dei raggi luminosi

si possono definire in modo analogo alle corrispondenti grandezze delle vibrazioni acustiche.

La lunghezza d'onda λ relativa alle vibrazioni di una radiazione semplice, ossia monocromatica (174), è misurata dal rapporto fra la velocità v di propagazione e la frequenza N, è cioè

$$\lambda = \frac{v}{N}.$$

Le lunghezze d'onda delle diverse radiazioni sono state direttamente misurate; esse, per la gamma dei raggi visibili, hanno un valore che varia da un massimo di 0,7 micron per il rosso a un minimo di 0,4 micron per il violetto. Da queste cifre, tenendo presente il valore della velocità della luce nel vuoto che è 200 mila Km. al secondo, coll'uso della precedente formola si trova per il rosso una frequenza di 43, $\times 10^{14}$ e per il violetto 7,5 $\times 10^{14}$ vibrazioni al secondo.

Frequenze enormemente maggiori di quelle che si hanno nei suoni, che sono comprese fra 8 e 20.000 vibrazioni al secondo.

Cenno sulle principali meteore luminose.

201. Rifrazione atmosferica e miraggio. — L'aria atmosferica ha una densità che cresce dagli alti ai bassi strati e per conseguenza nello stesso senso cresce il suo indice di rifrazione. Avviene allora che un raggio come SN (figura 330) emanato da una stella S, cammina in linea retta nel vuoto intersiderale, ma penetrando nell'atmosfera, nel passare da strati meno rifrangenti a strati più rifrangenti, subisce la rifrazione e descrive un cammino

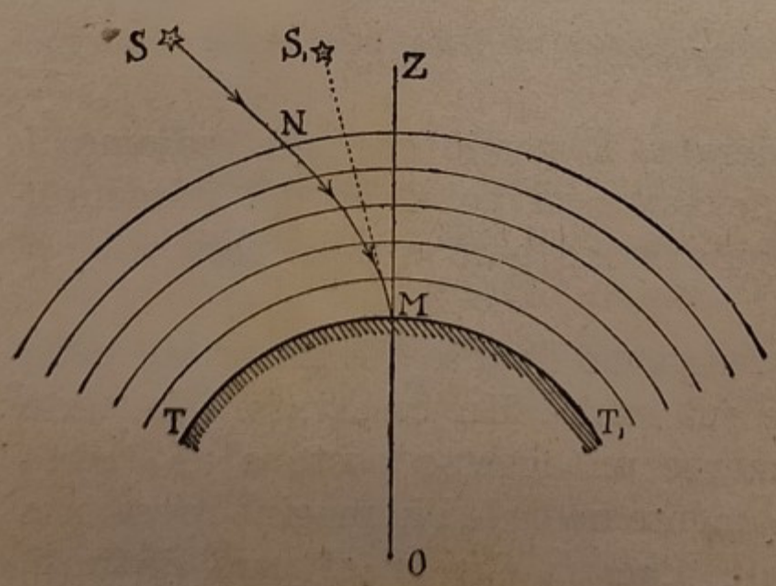


Fig. 330.

leggermente incurvato con la convessità in alto, giungendo all'occhio M dell'osservatore. Questo vede perciò arrivare la luce secondo la tangente MS_1, dandogli l'illusione di vedere la stella in S_1. L'effetto della rifrazione atmosferica è dunque uno spostamento apparente delle stelle verso lo zenit Z dell'osservatore. Tale spostamento, che è nella figura assai esagerato, cresce col diminuire dell'altezza della stella sopra l'orizzonte, ed è massimo al levare e al tra-

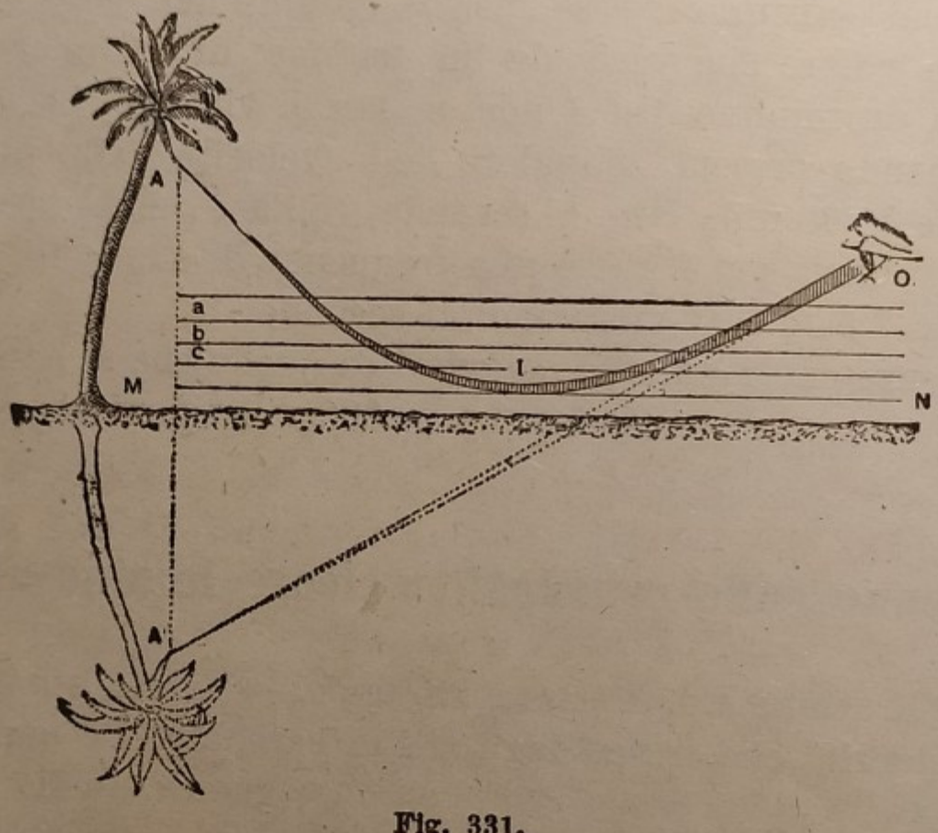


Fig. 331.

monto della stella considerata. È perciò che noi vediamo il Sole un po' prima della levata e un po' dopo del tramonto; tale anticipo e ritardo equivalgono però a poca cosa, cioè a circa due minuti.

Il *miraggio* è anche un fenomeno dovuto alla rifrazione nello strato d'aria incombente sul suolo. Un osservatore in certe circostanze vede direttamente un oggetto posto a una certa distanza, e contemporaneamente ne vede l'immagine rovesciata in uno specchio apparente d'acqua che gli si para davanti.

MN (fig. 331) rappresenta la superficie del suolo riscaldata dal Sole, e sopra il suolo, in perfetta calma si trovano degli strati d'aria di densità e di rifrangenza *crescenti verso l'alto.*

L'osservatore posto in O vede direttamente l'oggetto A. D'altra parte da A partono dei raggi obliqui verso il basso che incontrano degli strati d'aria a, b, c... via via meno rifrangenti, per cui tali raggi allontanandosi sempre più dalla normale scendono secondo un arco di curva e giungono a un punto I vicino a terra con tale inclinazione da raggiungere l'angolo limite, e da subirvi la riflessione totale. Per conseguenza i raggi risalgono seguendo un arco di curva presso a poco simmetrico a quello di discesa e arrivano all'occhio dell'osservatore, il quale così vede direttamente A e la sua immagine A', ed ha la perfetta illusione dell'esistenza di uno specchio d'acqua in luogo della superficie sabbiosa del suolo.

Il fenomeno, conosciuto dalla più remota antichità, è frequente nella pianura d'Egitto, dove fu notato dai soldati di Napoleone durante la campagna del 1798. Il naturalista Monge che accompagnava la spedizione ne dette per primo la giusta spiegazione.

Non è raro osservarlo anche nella pianura del Tavoliere di Foggia.

Tal'altra volta, per effetto di una distribuzione di strati d'aria in maniera inversa alla precedente, il fenomeno avviene per riflessione totale che si manifesta al di sopra dell'osservatore, il quale ha così l'illusione di vedere gli oggetti terrestri librati in aria e capovolti; il fenomeno è detto *fata morgana* ed è frequente in Calabria e in Sicilia.

202. Arcobaleno. — L'arcobaleno è dovuto alla dispersione ed alla riflessione della luce solare nelle goccie di pioggia, ed apparisce ad un osservatore che, voltando le spalle al Sole, abbia di fronte una nube risolventesi in acqua. Ha l'apparenza di una striscia circolare formata di archi concentrici coi colori dello spettro.

Il fenomeno ha luogo quando il Sole non sia troppo alto sull'orizzonte; e all'esterno dell'arco, che ha internamente il violetto ed esternamente il rosso, apparisce un secondo arco concentrico, assai meno luminoso, coi colori disposti inversamente.

Una porzione di arcobaleno si osserva anche ogniqualvolta una sorgente luminosa intensa, come il Sole o la luce elettrica,

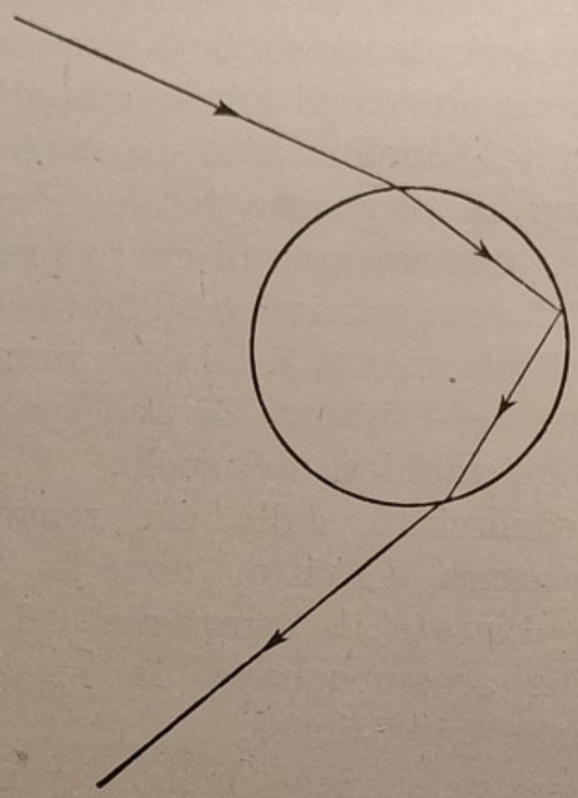


Fig. 332

collocata dietro le nostre spalle, illumina le goccie d'acqua di uno zampillo o di una cascata.

L'asse dell'arcobaleno è la retta che unisce il Sole e l'occhio

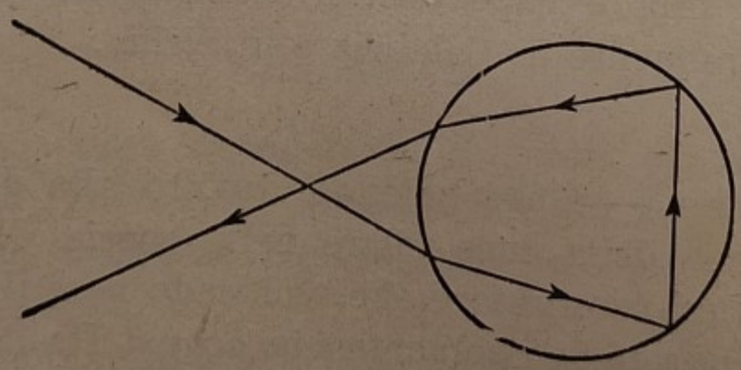


Fig. 333.

dell'osservatore, sicchè se apparisce mentre il Sole si leva o tramonta, l'arcobaleno diviene un semicerchio; e quanto più elevato è il Sole, tanto più sotto l'orizzonte giace il centro dell'arco e questo risulta tanto più piccolo,

Nella figura 332 è indicato il cammino che percorrono i raggi solari in una goccia d'acqua, dentro la quale disperdendosi e riflettendosi, dànno origine all'arco interno. La figura 333 riproduce invece il cammino dei raggi che riflettendosi due volte

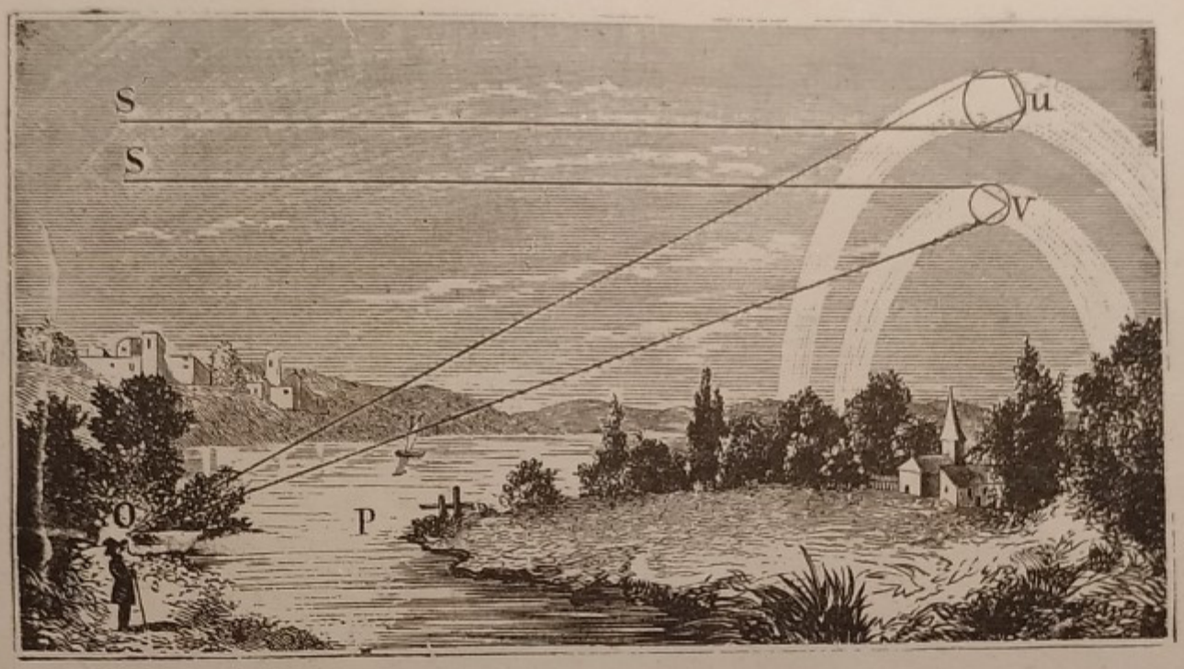


Fig. 334.

dentro la goccia dànno origine all'arco esterno. La figura 334 riproduce l'aspetto del fenomeno, nel meccanismo del quale non possiamo approfondirci. Diremo solo che le goccie che dànno origine all'arco interno si trovano a una distanza angolare compresa fra 40° e 42° dall'asse dell'arco, mentre fra 51° e 53° si trovano quelle che producono l'arco esterno.

ELETTROLOGIA E MAGNETISMO

Fenomeni principali di Magnetostatica.

203. Calamite naturali e artificiali. — Si trovano in natura certi pezzi di magnetite, minerale molto diffuso, — Fe_3O_4 — che hanno la proprietà di attirare il ferro. Sono queste le *calamite naturali*. La causa di tale attrazione venne chiamata *magnetismo*, forse dal nome di Magnesia, città dell'Asia Minore, dove i Greci ne avrebbero scoperto i primi campioni.

Il nostro studio ha per oggetto soltanto le proprietà delle *calamite artificiali*, sbarre di acciaio temperato, alle quali con determinati processi si può comunicare la proprietà di attirare il ferro.

Immergendo una calamita rettilinea nella limatura di ferro, si vede che l'attrazione si verifica di preferenza alle due estremità, dove si formano due ciuffi; e si osserva che la limatura non si attacca alla regione media. Chiameremo le regioni estreme col nome di *poli*, e regione *neutra* la regione mediana.

204. Differenza fra i poli di una calamita. — I due poli di una calamita non sono identici. Ciò si constata facilmente con l'*ago magnetico*, che è una calamita fatta con un pezzo di

molla d'acciaio tagliata a rombo allungato (fig. 335). Esso poggia, mediante un cappellino di acciaio o meglio di pietra dura, fissatovi verso il mezzo, sopra una punta verticale di acciaio, di guisa che riesca mobile in un piano orizzontale. L'ago, abbandonato a se stesso, dopo alcune oscillazioni si ferma in una direzione che va presso a poco da Nord a Sud. Il polo che volge a Nord lo si dice polo *nord*, l'altro polo *sud*.

Fig. 335.

La stessa esperienza si potrebbe ripetere con una calamita qualunque, sospesa a un filo senza torsione, in modo che possa muoversi solo in piano orizzontale.

Stabilita in tal modo la polarità di due calamite, lasciandone una sospesa, come or ora è stato detto, avvicinandole la seconda, si può facilmente riconoscere *che si ha attrazione fra due poli di nome diverso e ripulsione tra due poli dello stesso nome.*

205. Calamita spezzata. — Si prenda una calamita *AB* formata con un comune ferro da calze, se ne individuino i poli e

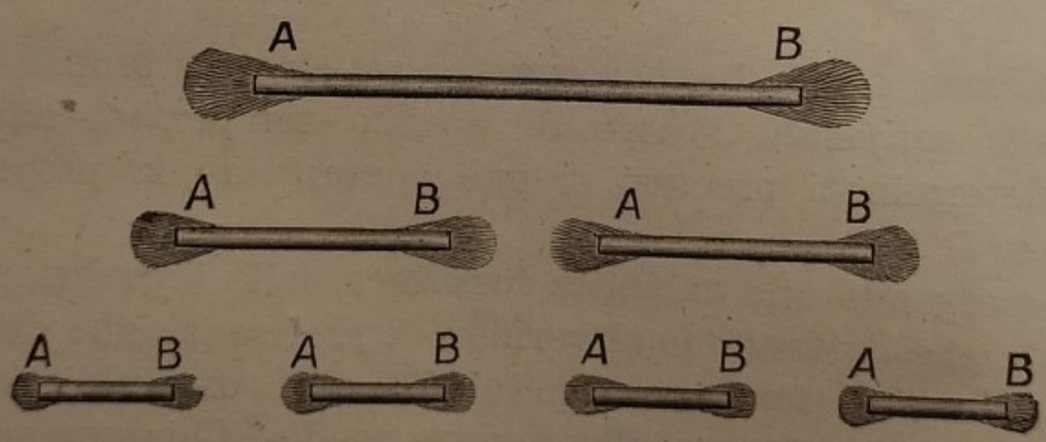


Fig. 336.

la si immerga nella limatura di ferro sì da avere ai due poli i soliti ciuffi (fig. 336). Tagliando in due la calamita mediante una pinza, alla superficie di frattura appariscono due nuovi poli e le due parti risultano due calamite complete. Il fenomeno si ripete rompendo successivamente in due le porzioni ottenute

in ciascuna delle quali i poli riescono disposti come nella calamita primitiva.

Riaccostando nel loro ordine i frammenti ottenuti, si forma una catena, nella quale i poli intermedi spariscono, in quanto alla loro azione esterna, e viene ricostituita la calamita primitiva, che conserva alle estremità i suoi poli.

Queste esperienze ci inducono a formulare un'ipotesi sulla costituzione delle calamite. Infatti si può ammettere che in una calamita esista una disposizione equivalente a un'infinità di piccoli *magneti elementari*, o *molecolari*, disposti in modo che tutti i loro poli omonimi sieno rivolti da una stessa parte. In seguito alla rottura di una calamita, alle due superficie di frattura sfiorerebbero in una tutti i poli di un certo nome, nell'altra tutti i poli di nome opposto delle due serie di magnetini elementari che vi arrivano.

206. Leggi delle azioni magnetiche - Unità di magnetismo. — Ogni calamita possedendo due poli indivisibili, è impossibile studiare l'azione fra due poli *isolati*. Quando si mettono in presenza due calamite si mettono in realtà in presenza quattro poli e quindi si hanno a rigore quattro azioni: due attrattive e due ripulsive.

Ma al caso teorico di due poli isolati ci possiamo avvicinare disponendo l'uno di fronte all'altro a piccola distanza due poli di due lunghe e sottili calamite, perchè allora gli altri due poli hanno azione insignificante sui primi e fra di loro, in ragione della loro grande distanza.

Il fisico francese Coulomb, alla fine del secolo XVIII, con classiche esperienze, misurò l'azione F esercitantesi fra due poli magnetici e trovò che tale *azione è direttamente proporzionale al prodotto delle quantità di magnetismo m ed m' che possedono i due poli, e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza r.* Legge, che possiamo esprimere con la formola:

$$F = \mp k \frac{mm'}{r^2} \qquad (1)$$

nella quale k è un coefficiente di proporzionalità, che dipende dalla natura del mezzo in cui si trovano i poli magnetici e

dalle unità scelte per la misura della forza, della quantità di magnetismo e della distanza.

La ragione del doppio segno della formola consiste nella convenzione di ritenere positivo il magnetismo nord, e negativo quello sud; se m ed m' sono ambedue positivi o negativi la forza F è *ripulsiva*, cioè, in base alla formola, *positiva*; se invece m ed m' sono di segno contrario, F è *negativa*, ossia *attrattiva*.

La legge di Coulomb sopra enunciata ci permette di definire l'*unità di quantità di magnetismo*, detta anche brevemente *unità di polo: un polo magnetico contiene l'unità di magnetismo, se, nel vuoto, respinge un polo magnetico eguale, posto alla distanza di un centimetro, con la forza di una dina.*

Questa definizione impone evidentemente che il coefficiente k della formola (1) sia nel vuoto eguale ad uno; infatti se in detta formola si fa $F = 1$, $m = m' = 1$, $r = 1$, si ottiene, in valore assoluto

$$1 = k \frac{1 \cdot 1}{1^2},$$

ossia $k = 1$.

207. Permeabilità magnetica. — Negli altri mezzi k ha invece valori diversi dall'unità. Nello studio di molti fenomeni magnetici è utile considerare la grandezza:

$$\mu = \frac{1}{k},$$

cioè l'inverso di k, detta *permeabilità magnetica del mezzo* che circonda i poli. Essa ha per quasi tutte le sostanze valori assai vicini ad uno, e in relazione a tal grandezza i corpi vengono divisi in *paramagnetici*, che hanno permeabilità magnetica superiore ad uno, e *diamagnetici* per i quali è $\mu < 1$. Si ha poi una terza categoria di corpi detti *ferromagnetici*, nei quali, a differenza di tutti gli altri, la permeabilità ha valori elevati, dell'ordine di grandezza di 100 o 2500. Sono questi il ferro, l'acciaio, il nichel e in genere tutte le sostanze che possono magnetizzarsi.

208. Campo magnetico. — Vien detto *campo magnetico* uno spazio dentro il quale risultano sensibili delle azioni magnetiche, e può essere prodotto da una o più calamite, o, come si vedrà in appresso, da correnti elettriche.

Supponendo ora di collocare in un certo punto A di un campo un *polo magnetico nord unitario*, esso sarà soggetto a una forza, detta *forza magnetica*, la cui intensità, direzione e senso costituiscono i caratteri del campo nel punto considerato. Sicchè per *intensità, direzione* e *senso di un campo in un punto, intenderemo la intensità, la direzione e il senso della risultante delle forze, alle quali sarebbe soggetta l'unità di magnetismo nord posta in quel punto.*

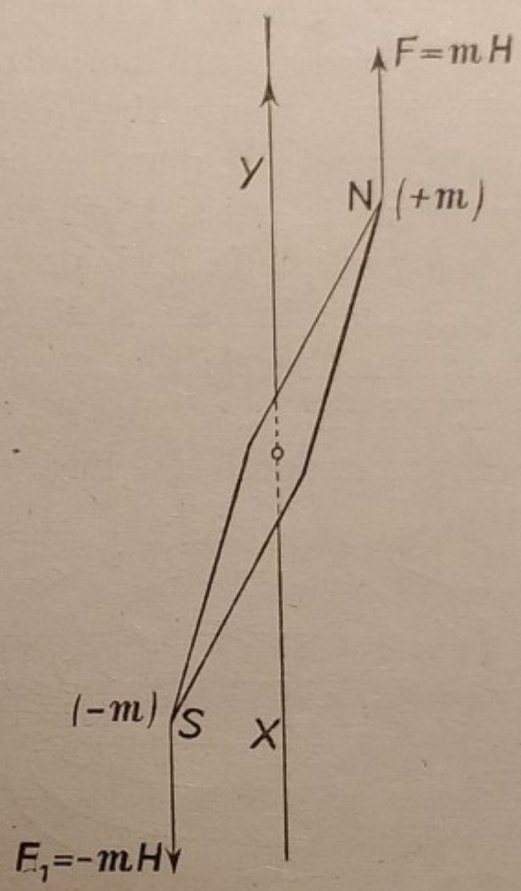


Fig. 337.

L'unità di campo è detta *gauss*; dire che un campo ha in un certo punto l'intensità o il valore di 1, 2 . . . gauss equivale a dire che la forza magnetica in quel punto del campo equivale a 1, 2 . . . *dine*.

Per convenzione, indicheremo l'intensità di un campo colla lettera H, e perciò, se nel punto A di un campo si trova una massa magnetica m, la forza F cui è soggetta, è, per la legge di Coulomb, data dal prodotto di H per m, cioè $F = Hm$.

Un campo magnetico è detto *uniforme* se in ogni suo punto l'intensità, la direzione e il senso sono eguali. Un ago magnetico girevole posto in un campo uniforme tende a disporsi parallelamente alla direzione XY del campo. Infatti i suoi due poli N ed S (fig. 337) possedendo quantità di magnetismo $+m$ e $-m$, sono soggetti alle forze $F = Hm$ e $F_1 = -Hm$, cioè forze della stessa intensità, di senso contrario e aventi la stessa direzione, quella del campo. Esse perciò formano una coppia che agisce sull'ago per portarlo nella direzione XY del campo.

209. Linee di forza. — Una massa magnetica nord supposta libera in un punto di un campo, obbedirebbe alla forza che la sollecita e assumerebbe un movimento nel senso del campo, segnando nello spazio una traiettoria che viene detta *linea di forza*. Questa denominazione è basata sul fatto che la forza magnetica, che determina il moto del polo considerato, è in ogni punto tangente alla traiettoria descritta dal polo stesso.

Un piccolo ago magnetico libero, posto in un campo non può assumere un moto traslatorio, perchè è solo soggetto a un'azione orientatrice, com'è spiegato nel precedente paragrafo, ma si dispone nella direzione che ha il campo nella posizione in cui si trova, ossia tangente alla linea di forza che passa per quella posizione, e col suo polo nord segna il senso del campo. In base a ciò ogni linea di forza di un campo portano una freccia che segna appunto il senso del campo.

La figura 338 porta segnate alcune linee di forza nel campo prodotto da una calamita rettilinea; si osserva che tali linee *escono* dal polo nord e attraverso lo spazio circostante *entrano* per il polo sud.

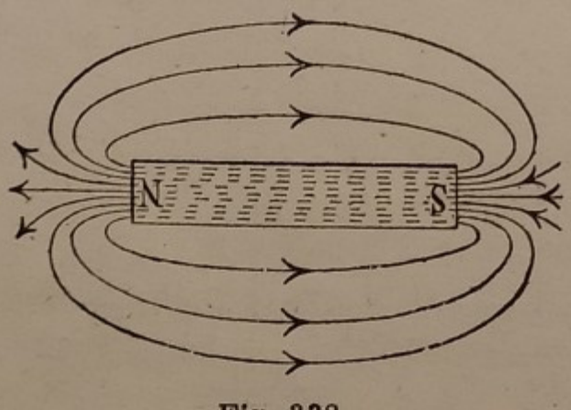


Fig. 338.

In certi casi fa poi comodo di immaginare prolungate le linee di forza nell'interno delle calamite. Tali linee si dicono *linee di induzione* e vanno dal polo sud al polo nord.

In un campo uniforme le linee di forza sono tutte rette parallele fra loro.

210. Induzione magnetica. — Una sostanza ferromagnetica (207) — ferro, leghe di ferro, nichel, cobalto — posta in un campo magnetico, si magnetizza per *induzione*. Un pezzo di ferro dolce *ab* (fig. 339) posto sul prolungamento di una calamita *AB* si magnetizza in modo che i due poli vicini *A* e *b* sono di nome contrario. Va da sè che una seconda sbarra di ferro dolce, messa di seguito alla prima, si magnetizza alla sua volta nello stesso modo, e così si spiega la formazione dei ciuffi di

limatura che si ottengono ai poli di una calamita, perchè i granelli a contatto coi poli diventano calamite e attirano degli altri granelli. Il fenomeno in scala maggiore è illustrato nella figura 340 in cui si ottiene una *catena magnetica* con dei pezzetti di ferro dolce che si attaccano l'uno all'altro succes-

Fig. 339.

sivamente quando il primo sia a contatto di un polo di una calamita.

Va notato che il magnetismo delle sbarrette di ferro dolce cessa o quasi quando vengono allontanate dalla calamita induttrice. Col ferro dolce si possono ottenere solo calamite *temporanee*.

Se invece del ferro dolce si usa l'acciaio, questo rimane magnetizzato anche se si annulla il campo magnetizzante, conserva cioè del *magnetismo residuo*. Per smagnetizzare completamente il pezzo occorre porlo in un campo magnetico di senso opposto a quello nel quale aveva subìto l'induzione, e di sufficiente intensità. L'intensità di questo campo necessaria ad annullare il magnetismo residuo, prende il nome di *forza coercitiva*. Essa ha valori diversi nelle diverse sostanze ferro-magnetiche. Debole nel ferro dolce, è grandissima nell'acciaio, particolarmente in certi acciai speciali. Questi fenomeni del magnetismo residuo e della forza coercitiva, si chiamano fenomeni d'*isterèsi magnetica*.

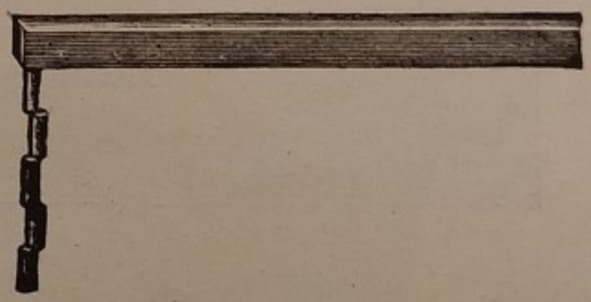


Fig. 340.

È importante infine tener presente l'andamento delle linee di forza di un campo magnetico entro il quale sia posto un pezzo di sostanza ferromagnetica; *le linee di forza tendono ad addensarsi verso il corpo e ad attraversarlo*. Da questa proprietà deriva il nome di *permeabilità magnetica*; ciò che è reso più evidente nel seguente paragrafo.

211. Spettri magnetici. — L'induzione magnetica di cui è fatto cenno precedentemente ci dà la ragione degli spettri magnetici, coi quali si può, per così dire, materializzare le linee di forza.

Sopra un cartone o un vetro, poggiato orizzontale sopra una calamita, si sparge della limatura di ferro mediante uno staccio. Ciascun granello di limatura diventa per induzione una piccola

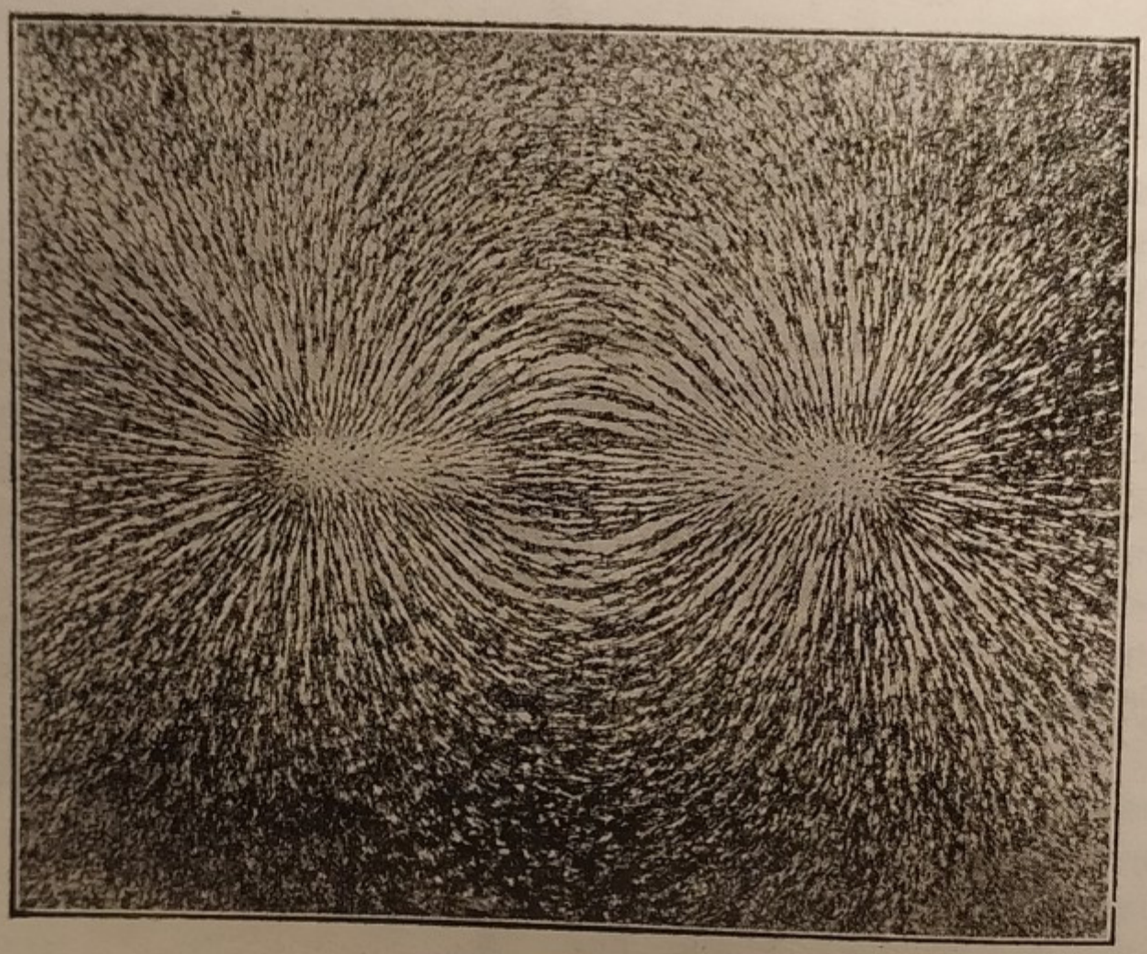


Fig. 341.

calamita e tende, alla guisa del piccolo ago considerato nel § 209, a mettersi col suo asse, cioè colla sua maggiore dimensione, secondo la direzione del campo. Imprimendo delle piccole scosse al cartoncino i granelli di limatura sobbalzano e, liberi dall'attrito, prendono l'orientazione loro imposta dalle forze del campo. In tal modo si riuniscono uno di seguito all'altro e disegnano un sistema di linee di forza detto *spettro magnetico*. La figura 341 mostra lo spettro di una calamita diritta: le linee di forza partono da un'estremità della sbarra per entrare nell'altra.

La figura 342 mostra lo spettro di una calamita a ferro di cavallo coricata orizzontalmente sotto il cartoncino. Notevole l'andamento delle linee fra le due branche, dove per uno spazio abbastanza esteso risultano sensibilmente fra di loro parallele. Quivi il campo è uniforme.

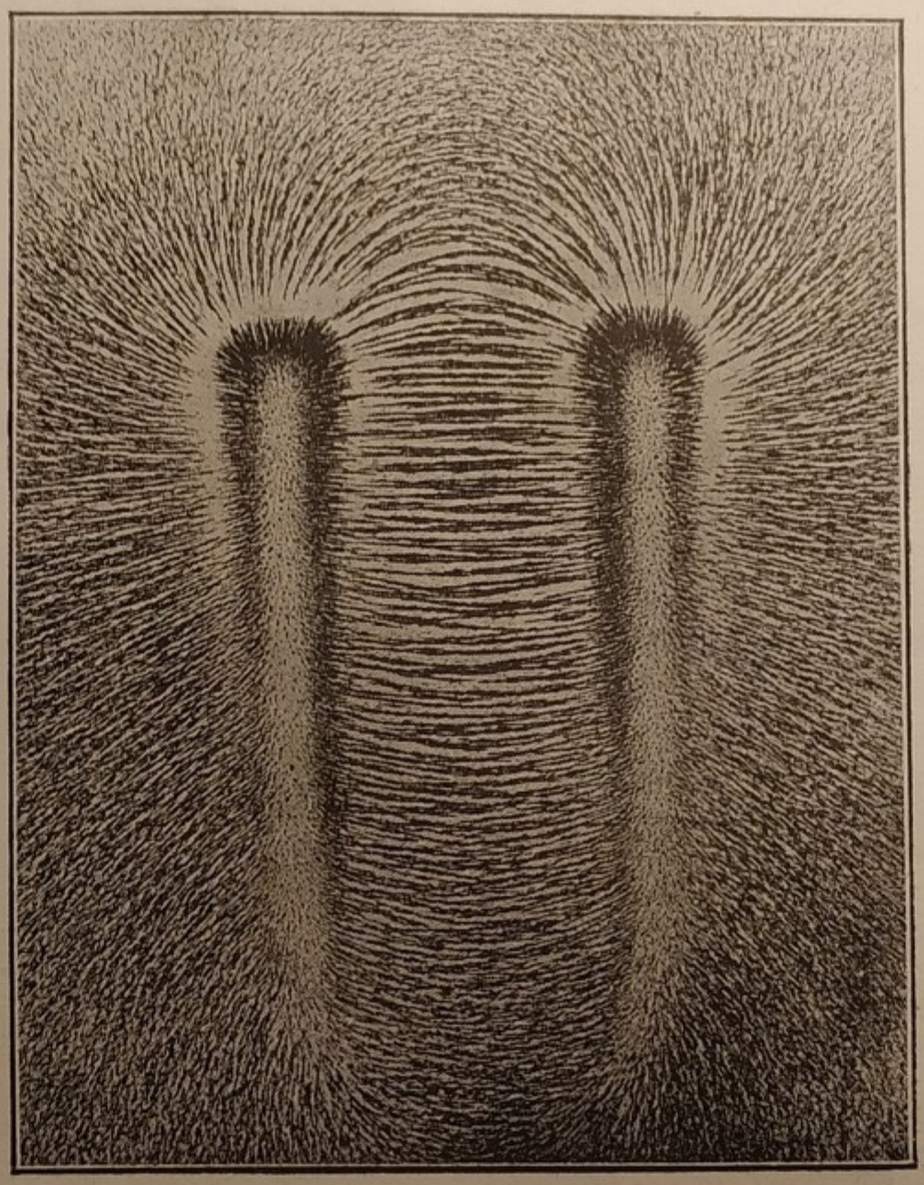


Fig. 342.

Ora, per avere più chiaro il concetto della permeabilità magnetica di cui è detto in precedenza, si osservi lo spettro ottenuto con una calamita a ferro di cavallo davanti ai poli della quale è posta una sbarretta rettangolare di ferro dolce (fig. 343). L'andamento delle linee di forza è fortemente modificato in confronto di quello della figura 342: tra i poli della calamita e le estremità della sbarretta si osserva un rinfitti-

mento delle linee di forza dovuto alla permeabilità della sbarra stessa.

Il fenomeno è assimilabile al passaggio dell'acqua di un canale attraverso un setto disposto normale all'asse del canale, setto avente verso il mezzo una regione con nu-

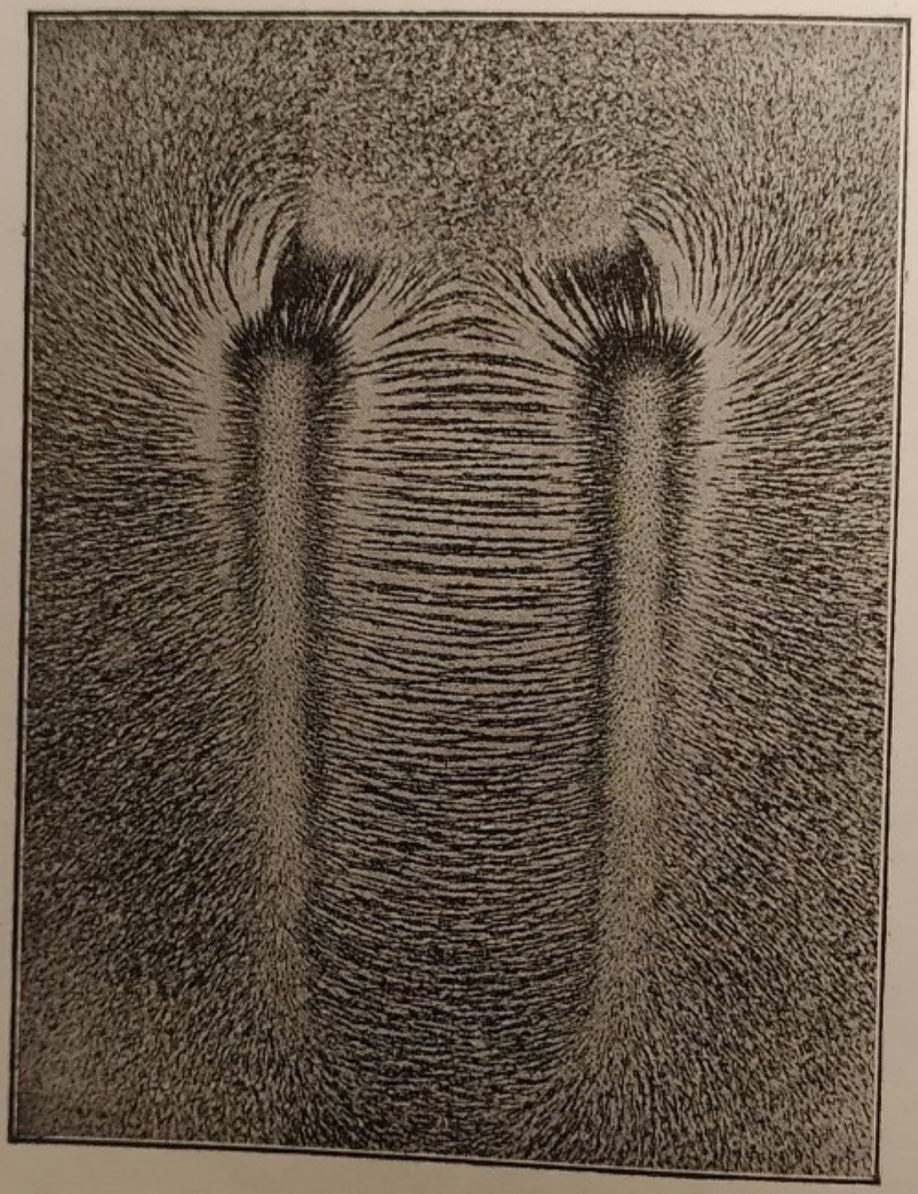


Fig. 343.

merosi e larghi fori e lateralmente fori più radi e più piccoli. Verso la regione mediana del setto, che è più *permeabile*, affluiscono in gran copia i vari filetti liquidi incurvando la propria traiettoria.

212. Schermi magnetici. — Dalle cose che precedono deriva una notevole conseguenza.

Se in un campo magnetico introduciamo un blocco di ferro dolce, presentante una cavità, le linee di forza preferiscono di attraversare lo spessore del ferro abbando-

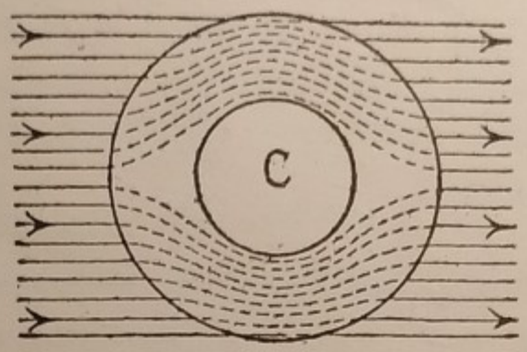


Fig. 344.

nando la cavità, che offre loro una resistenza assai maggiore (fig. 344). Nella cavità il campo è zero e un corpo introdottovi rimane assolutamente sottratto all'influenza ma-

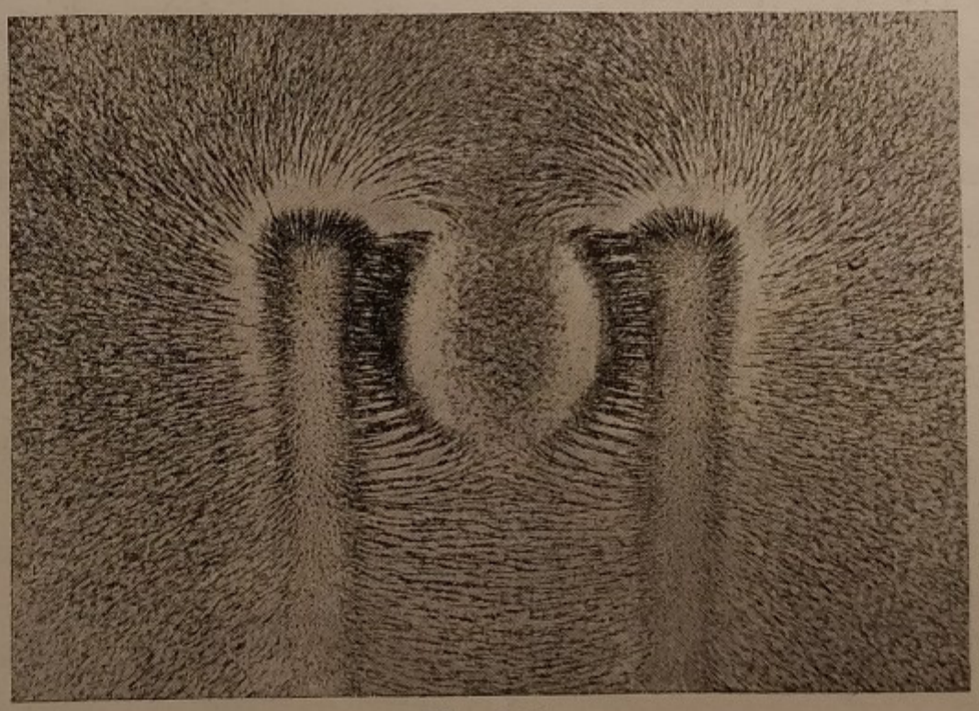


Fig. 345.

gnetica del campo esterno. Vien così realizzato uno *schermo magnetico.*

La fig. 345 mostra lo spettro ottenuto ponendo tra i poli di una forte calamita a ferro di cavallo un grosso anello di ferro dolce; nella cavità si ha l'assenza quasi assoluta di granelli orientati,

213. Flusso magnetico. — Per rappresentare graficamente un campo magnetico, si usa segnare alcune delle sue linee di forza, col criterio che siano più fitte nei punti in cui l'intensità del campo è maggiore, e più rade là dove l'intensità è più piccola. Per es., le linee di forza segnate nella figura 346

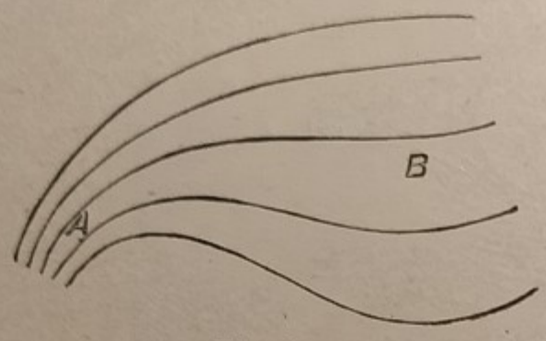


Fig. 346.

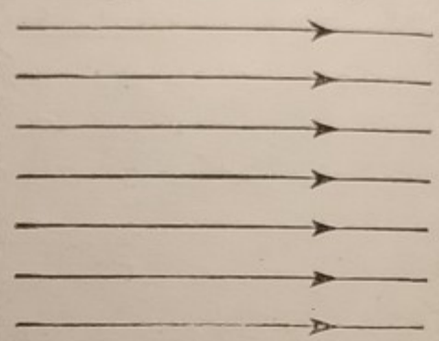


Fig. 347.

rappresentano un campo che ha grande intensità in A e debole intensità in B.

Un campo magnetico uniforme ha tutte le sue linee di forza rette e parallele; esso può essere rappresentato con la figura 347 dove le linee hanno distanze eguali l'una dall'altra, per significare che l'intensità ha dappertutto lo stesso valore.

Si consideri ora il campo della figura 348 e in esso si ponga una superficie, della quale l'arco SS sia l'intersezione col piano della figura. Nella posizione in cui si trova, la superficie è attraversata da 5 linee di forza. Trasportiamola in S_1S_1 dove l'intensità del campo è maggiore. Nella nuova posizione essa è attraversata da un maggior numero di linee di forza e precisamente da 9. Giova però notare che il numero di linee di forza che attraversano le superficie considerate, non dipende solo dalla maggiore o minore fittezza delle linee stesse, vale a dire dall'intensità che ha il campo nella regione dove la superficie è posta, ma anche dall'orientamento della superficie stessa. Il numero di linee di forza che attraversano una superficie piana è evidentemente massimo quando è perpendicolare alla direzione delle linee ed è nullo se è disposta parallela alle linee stesse.

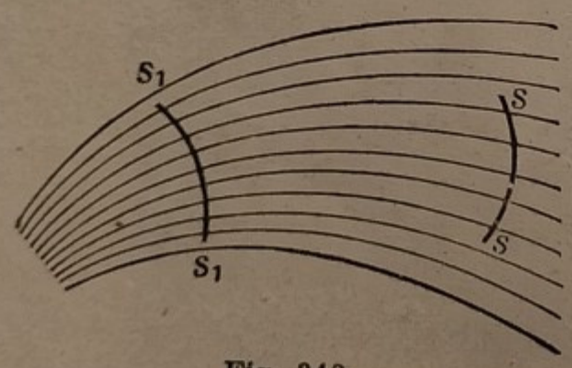


Fig. 348.

Tale fatto di solito si esprime usando una locuzione più comprensiva: diremo cioè che la superficie considerata è attraversata da un *flusso di forza magnetica* tanto maggiore quanto è maggiore il numero di linee di forza che la attraversano. Nel caso speciale che si tratti di un campo uniforme di intensità H e di una superficie piana di area S posta perpendicolare al campo, il flusso Φ che la attraversa è dato dalla relazione

$$\Phi = HS\,;$$

con ciò però si suppone, com'è logico, che la rappresentazione del campo venga fatta segnando H linee di forza attraverso a ogni centimetro quadrato della superficie posta perpendicolare alla direzione del campo. Allora il prodotto HS è il numero di linee di forza che attraversano la superficie; quindi si può anche dire che *il flusso di forza attraverso una superficie è misurato dal numero delle linee di forza che la attraversano.* Questa definizione vale per qualunque superficie, piana o no, e comunque orientata.

Notisi che se H è misurato in gauss (208) ed S in cm^2, il flusso Φ è misurato in *maxwell*, essendo questa l'unità stabilita per la misura del flusso magnetico, ossia il *flusso attraverso la superficie di 1 centimetro quadrato posta perpendicolare a un campo uniforme dell'intensità di 1 gauss.* Al flusso verrà logicamente attribuito un segno, il segno di H.

214. Campo magnetico terrestre. — Tutto attorno alla Terra, per un'altezza imprecisata, esiste un campo magnetico, la cui origine sfugge affatto all'indagine degli Scienziati, detto campo *magnetico terrestre.*

Infatti, mentre una sbarra, formata di sostanza non magnetica, sospesa per il suo centro di gravità, resta in equilibrio indifferente, perchè il suo peso è equilibrato dalla resistenza del punto di sospensione, una sbarra magnetizzata sospesa nello stesso modo si *orienta*; ciò vuol dire che è soggetta ad altre forze all'infuori della gravità. Queste forze sono attribuite ad un'azione magnetica della Terra.

La sbarra si dispone all'ingrosso da Nord a Sud e le cose passano come se la Terra fosse attraversata da una grande

calamita, avente il suo polo *sud* verso il *Nord*, e inversamente. Nulla però ci autorizza ad ammettere l'esistenza di una tale calamita e la causa del magnetismo terrestre è tuttora ignota.

Comunque sia, è certo che l'azione magnetica terrestre sopra una calamita si riduce ad una *coppia*, cioè a un'azione *semplicemente direttrice* e la sbarra si trova in equilibrio quando le due forze parallele ed opposte della coppia risultano sul prolungamento l'una dell'altra.

Fig. 349.

Il campo terrestre, in uno spazio non troppo esteso, quale può essere il volume di una stanza ordinaria, si può ritenere uniforme; infatti sospendendo in vari punti di una stanza delle piccole calamite, fissate nel loro centro di gravità, si osserva che si orientano disponendosi fra loro parallele.

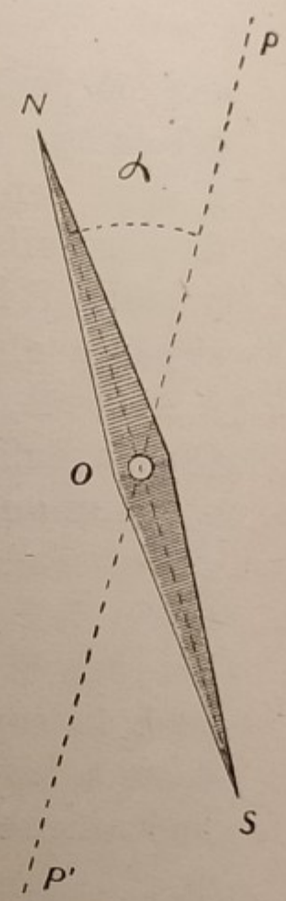


Fig. 350.

215. Meridiano magnetico; declinazione e inclinazione magnetiche. — La direzione del campo magnetico terrestre in un punto dato dello spazio, si individua mediante due angoli, la *declinazione* e la *inclinazione*. Per determinarli si può usare un ago magnetico sospeso liberamente per il suo centro di gravità, che obbedendo esclusivamente alla coppia del campo terrestre si orienta secondo una determinata direzione segnando col suo asse la direzione del campo terrestre nel luogo dove si trova (fig. 349).

Il piano verticale passante per i poli del detto ago si chiama *meridiano magnetico* e fa, in generale, col *meridiano geografico*, un angolo che vien detto *declinazione magnetica*. La fig. 350 rappresenta l'ago suaccennato proiettato in piano orizzontale secondo NS; PP' rappresenta il meridiano geografico, l'angolo $\alpha = NOP$ è la declinazione.

La declinazione vien detta *occidentale* od *orientale* secondochè il polo nord dell'ago si trova ad occidente o ad oriente del meridiano geografico. La declinazione più semplicemente viene ottenuta coll'ago rappresentato nella figura 335 del § 204, che appunto per ciò si dice *ago di declinazione*, mentre l'ago della figura 349 vien detto più propriamente *ago di inclinazione*.

L'*inclinazione* magnetica è l'angolo formato dall'asse magnetico dell'ago della fig. 349 col piano orizzontale e la riterremo *positiva* se il polo nord dell'ago è diretto verso Terra, *negativa* nel caso opposto.

216. Variazione degli elementi magnetici terrestri. — La declinazione, l'inclinazione e l'intensità del campo costituiscono i così detti *elementi magnetici* di un luogo. Sono grandezze variabili da luogo a luogo, e per lo stesso luogo subiscono delle variazioni col tempo, le quali si distinguono in *regolari* e *accidentali*.

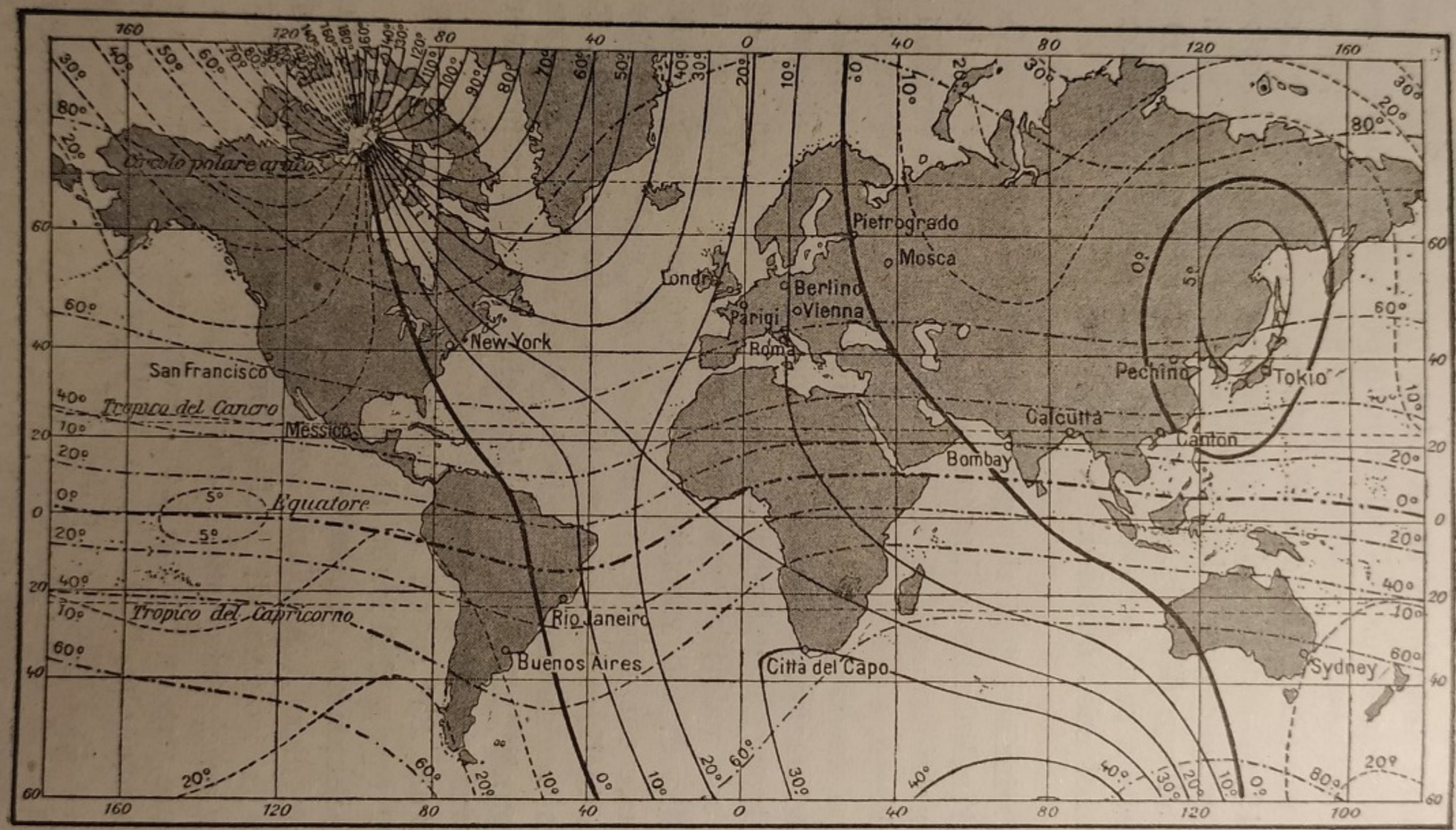
La declinazione, alla stessa epoca, ha valori diversi da luogo a luogo; attualmente in Europa la declinazione è occidentale con valori decrescenti verso oriente. Per avere una chiara idea di tali variazioni si segnano su carte geografiche le linee che congiungono i luoghi che alla stessa epoca hanno la stessa declinazione, o, come si dice, le linee *isogoniche*. Esse hanno un andamento generale da Nord a Sud e si incontrano in due punti detti *poli magnetici*, che non occupano in verità sulla Terra posizioni rigorosamente fisse.

La figura 351 porta le isogene per tutta la Terra: la figura 352 quelle dell'Italia al 18 gennaio 1931.

La declinazione poi subisce variazioni nello stesso luogo, alcune regolari o secolari, consistenti in una lenta oscillazione della isogona di declinazione nulla, altre accidentali, dette *burrasche magnetiche*, dovute alle aurore boreali e ad altre cause, tra cui vanno indubbiamente comprese le macchie solari, tanto che l'astronomo Wolf arrivò a dire che l'ago magnetico fa l'ufficio di *polso del Sole*.

In Italia si constata nella declinazione una diminuzione regolare media annua da 5′ a 6′.

Analoghe variazioni si hanno per la inclinazione e la fig. 351 porta anche le *isocline* — linee di egual inclinazione —



Linee d'eguale declinazione Ovest
" " " Est
" di declinazione nulla
Linee d'eguale inclinazione
" senza inclinazione

Fig. 351.

CARTA DELLE ISOGONE PER L'ITALIA

al 1º Gennaio 1931.

Fig. 352.

segnate con linee e punti, che hanno un andamento generale da Est ad Ovest.

Con carte come quelle sopra descritte portanti le isogone, dette *carte magnetiche*, il navigante, guardando la bussola, può dirigere la rotta a suo talento.

217. Bussola terrestre e marina. — La *bussola terrestre* è un ago di declinazione mobile sopra una corta punta fissata sul fondo di una scatola resa orizzontale a mezzo di una livelletta; i poli dell'ago sfiorano una circonferenza divisa.

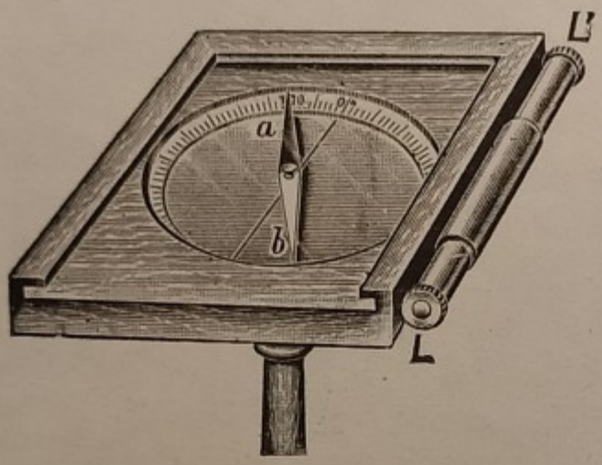


Fig. 353.

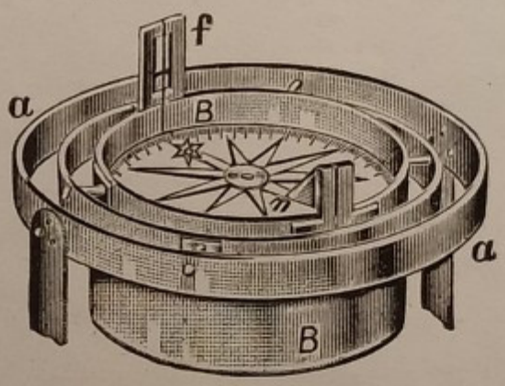


Fig. 354.

La bussola vien girata in modo che la linea 0° — 180° della graduazione formi coll'ago l'angolo di declinazione, il polo nord dell'ago essendo a occidente di tal linea se la declinazione è occidentale. In tal caso la linea 0° — 180° segna il meridiano geografico passante per il luogo di osservazione. Tale bussola è usata nelle miniere e dagli agrimensori; ed è qualche volta accompagnata da un cannocchiale *LL'* (fig. 353) fissato parallelamente alla linea 0° — 180°, il quale serve per realizzare una visuale perfettamente diretta da Nord a Sud.

La *bussola marina* (fig. 354) consta di una scatola cilindrica, zavorrata, sul fondo della quale e in direzione del suo asse è fissato il pernio sul quale poggia, per mezzo di un cappelletto di agata, un ago di declinazione. La scatola è sospesa col *sistema cardanico*, così il pernio si mantiene sempre verticale e l'ago orizzontale comunque s'inclini la nave. L'ago è fissato al disotto di un disco di cartoncino o di mica, sul quale

è segnata la rosa dei venti e una divisione in gradi. Sulle pareti interne della scatola è segnata una linea fissa, la *linea di fede*, diretta secondo l'asse della nave. Oggi la bussola marina è adattata anche agli aeroplani e ai dirigibili, che in tempo di nebbia non hanno altro mezzo di direzione.

Fenomeni principali di Elettrostatica.

218. Elettrizzazione per strofinio. — Un bastone di vetro o di ceralacca, un pezzo d'ambra, di zolfo, d'ebanite, ecc., quando vengono strofinati con un pannolano acquistano la proprietà di attirare dei corpuscoli leggeri, quali frammenti di carta, di barbe di penne, di sughero. Si dice che tali corpi si *elettrizzano* e si chiama *elettricità* la causa del fenomeno.

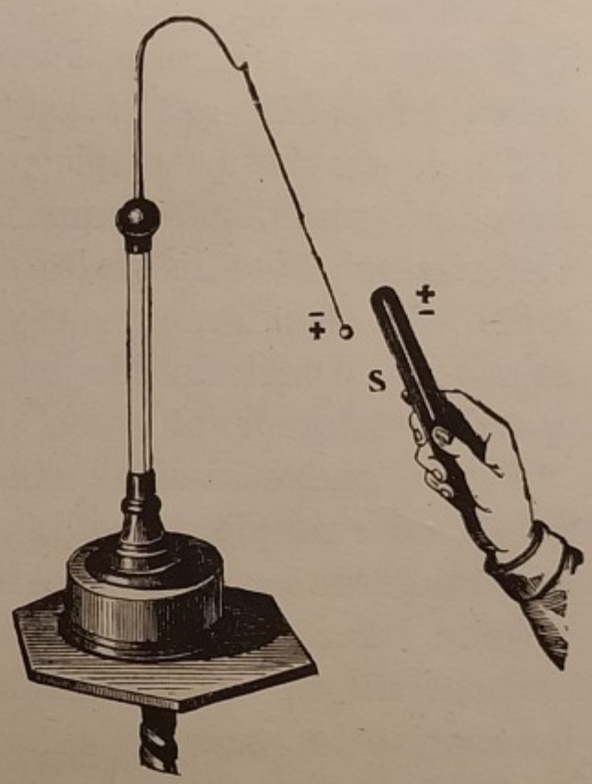


Fig. 355.

La conoscenza di tale proprietà nell'ambra rimonta a Talete di Mileto che visse nel VI secolo a. C., e il nome elettricità venne dal nome *electron* che i Greci davano all'ambra.

Nei fenomeni citati però le forze attrattive sono assai deboli, quindi per renderne visibili gli effetti è necessario farle agire su corpi mobili e liberi il più che è possibile. Serve allo scopo il *pendolino elettrico* (fig. 355), formato di una pallina leggerissima di sughero, o meglio di midolla di sambuco, sospesa a un filo di bozzolo. Un bastone *S* elettrizzato, avvicinato alla pallina, l'attira spostandola notevolmente dalla sua posizione.

219. Buoni e cattivi conduttori dell'elettricità. — Se strofiniamo una bacchetta di ebanite solo verso un'estremità, potremo facilmente constatare che soltanto la regione strofinata ha la facoltà di attirare la pallina del pendolino.

Se invece accostiamo al pendolino una bacchetta metallica, strofinata col pannolano, non si riesce a riscontrare alcuna attrazione; ma se tale bacchetta è sostenuta mediante un manico di vetro, dopo lo strofinio attira il pendolino. Si constata però che tutti i punti della bacchetta metallica agiscono sul pendolino, ciò che dimostra che anche i metalli si elettrizzano per strofinio, ma l'elettricità in essi si propaga in tutti i loro punti, a differenza del vetro e dell'ebanite, nei quali, come si è detto, la elettricità rimane localizzata nella regione dove s'è prodotta.

I metalli e gli altri corpi che presentano lo stesso comportamento si dicono *buoni conduttori* della elettricità; il vetro e l'ebanite *cattivi conduttori*.

In ciò troviamo la spiegazione dei fenomeni precedenti: la bacchetta metallica, tenuta in mano e strofinata, *non mostra* di elettrizzarsi. Essa in realtà si elettrizza, ma la elettricità man mano che si sviluppa viene condotta dalla regione strofinata attraverso il metallo alla mano, e da questa passa al corpo dello sperimentatore e al suolo, che sono corpi buoni conduttori.

Perciò anche avviene che un corpo conduttore elettrizzato, come, ad esempio, la pallina del pendolino, quando sia toccato col dito perde la sua carica e torna, come si dice, allo stato neutro.

Sono buoni conduttori in ordine decrescente: i metalli, il carbone di storta, le soluzioni acide e saline, l'acqua comune, i tessuti e le corde di canapa, il sughero, i corpi animali, il suolo, i gas rarefatti.

Sono cattivi conduttori: l'aria e i gas, nelle condizioni ordinarie, lo zolfo, la paraffina, il vetro, le resine, la seta, il vuoto perfetto.

I corpi cattivi conduttori li diciamo anche *isolanti* o *coibenti*.

Non si passa però con un salto brusco dai corpi buoni conduttori come i metalli, ai corpi isolanti come il vetro; di mezzo esiste una lunga serie di corpi di conduttività gradualmente descrescente.

220. Due specie di elettricità. — Si può facilmente provare che il vetro e la resina strofinati con un pannolano prendono elettricità diverse.

Infatti, se si avvicina un bastone di vetro liscio, strofinato con un pannolano, al pendolino elettrico, questo viene attratto, tocca il vetro e subito dopo viene respinto, nè è possibile toccarlo col bastone di vetro elettrizzato per quanto lo si insegua con questo.

Or, lasciando il pendolino com'è, carico della elettricità del vetro, gli si accosti un bastone di resina — ceralacca, ebanite — già strofinato col pannolano; si vedrà che il pendolino viene vivamente attratto.

Si scarichi ora il pendolino toccandolo col dito, e si ripeta la prova usando prima il bastone di resina elettrizzata; si vedrà ancora che il pendolino finchè è carico dell'elettricità della resina, dalla resina elettrizzata viene respinto, ma viene vivamente attratto dal vetro strofinato. E poichè, sottoponendo alla prova tutti i corpi si osserva che gli uni si comportano come il vetro, gli altri come la resina, e mai in una terza maniera diversa, concludiamo che ci son due specie di elettricità: *vitrea* o *positiva*, *resinosa* o *negativa*.

Si tenga tuttavia sempre presente che nel fare tale distinzione, noi ammettiamo di chiamare elettricità *vitrea* o *positiva* quella che si sviluppa sul *vetro liscio* strofinato con un *pannolano*, e elettricità *resinosa* o *negativa* quella della *resina* strofinata con un *pannolano*. Perchè l'esperienza mostra che la specie di elettricità che un corpo acquista per strofinio dipende, oltre che dalla sua natura, anche dallo stato della sua superficie e dalla natura del corpo strofinante; così un bastone di vetro *smerigliato*, strofinato con un pannolano, si elettrizza negativamente. Ciò è facile mostrare facendo uso di un bastone di vetro metà liscio e metà smerigliato. Il vetro liscio poi prende ancora carica negativa quando viene strofinato sulla schiena di un gatto vivo, mentre si elettrizza normalmente strofinandolo con una pelliccia di gatto conciata.

Concludendo, esistono *due specie di elettricità* e *due corpi carichi di una stessa specie di elettricità si respingono; carichi di elettricità differenti si attraggono.*

Infine è da notare che non è mai possibile sviluppare una sola specie di elettricità; le due elettricità si sviluppano sempre insieme in quantità eguali. Il fatto ha la sua spiegazione nel § 240.

221. Elettroscopio a foglie d'oro. — In molti fenomeni elettrici che dovremo spiegare, le forze attive sono debolissime sì da non essere rilevate dal comune pendolino. Giova in tali casi l'*elettroscopio a foglie d'oro*. Nella sua forma comune esso è formato di una boccia di vetro (fig. 356) nella quale penetra un'asta metallica terminante in alto con una sferetta metallica, detta *bottone*, e che in basso porta sospese e pendenti due striscie di foglia d'oro. L'asta metallica vien fatta passare attraverso a un turacciolo di zolfo o di paraffina per assicurarne il miglior isolamento.

Fig. 356.

Così mettendo a contatto col bottone un corpo debolmente elettrizzato anche le foglie si elettrizzano ed essendo cariche dello stesso nome si respingono presentando una divergenza.

222. Leggi delle azioni elettriche - Unità di elettricità. — Il Coulomb, con un procedimento analogo a quello adoperato per l'azione fra due poli magnetici (206), trovò che anche l'azione fra due corpi elettrizzati è regolata dalle stesse leggi, cioè:

1° *L'azione mutua fra due corpi elettrizzati è proporzionale al prodotto delle quantità di elettricità che possiedono.*

2° *Tale forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dei corpi stessi.*

Quindi anche in questo caso vale la formola:

$$F = \mp k \frac{mm'}{r^2}$$

colle stesse considerazioni fatte sul magnetismo.

L'*unità teorica* di quantità di elettricità è quindi *la quantità di elettricità che deve possedere una piccola sfera perchè posta nel vuoto, in presenza di una sfera egualmente carica, alla distanza di 1 centimetro — distanza dei centri — la respinga colla forza di 1 dina.*

Con tale convenzione il coefficiente k della formola è per il vuoto eguale all'unità. Negli altri mezzi il k ha valori in generale minori di uno; ciò significa che la forza con cui si attraggono o si respingono due cariche in un mezzo qualsiasi è in generale minore di quella con cui esse agirebbero alla stessa distanza nel vuoto. Nell'aria il k è assai prossimo all'unità.

L'inverso:

$$\varepsilon = \frac{1}{k}$$

risulta quindi in genere superiore ad uno; lo si nomina *costante dielettrica* del mezzo. Diamo qui appresso i valori di ε per alcune sostanze:

aria	1,0006	ebanite	2,4
paraffina	2	zolfo	2,5
vetro	7	acqua	80

L'unità di elettricità sopra definita è però l'unità teorica, troppo piccola per i bisogni della tecnica elettrica. L'unità pratica è il *coulomb*, eguale a $3{,}10^9$ unità teoriche.

Nei fenomeni di Elettrostatica, di cui stiamo ora occupandoci, le cariche attive sono frazioni minime di coulomb, ma nei fenomeni delle correnti elettriche la quantità di elettricità in movimento risulta enormemente maggiore.

223. Campo elettrico. — Con questo nome viene chiamato *uno spazio dentro il quale risultano sensibili delle forze elettriche.* In modo concreto, ponendo in un punto qualunque di tale spazio un corpo elettrizzato, questo è soggetto a una forza attrattiva o ripulsiva. Un campo elettrico si ha dunque sempre nello spazio che circonda uno o più corpi elettrizzati.

Un campo elettrico è caratterizzato dagli stessi elementi che caratterizzano un campo magnetico, di cui ci siamo già occupati (208) e anche nel campo elettrico si presentano le linee di forza che abbiamo studiate nel campo magnetico.

224. Potenziale elettrico. — Se si hanno due conduttori A e B, isolati, carichi di elettricità e si fanno comunicare fra loro, mettendoli direttamente a contatto o riunendoli con un filo metallico, due cose possono avvenire: o si scam-

biano della elettricità sì che dopo il contatto le loro cariche risultano diverse, oppure non si verifica alcuno scambio, per cui dopo il contatto le rispettive cariche rimangono inalterate.

Nel primo caso diremo che i due conduttori hanno inizialmente *diverso potenziale* e particolarmente potenziale *maggiore* quello che in seguito al contatto *ha perduto* della elettricità; nel secondo caso diremo che i due conduttori hanno lo *stesso potenziale*.

Incontriamo qui una grandezza, il potenziale, che corrisponde alla temperatura dei corpi, e all'altezza che un liquido ha in un recipiente. Sappiamo infatti che la condizione necessaria per il passaggio del calore fra due corpi messi a contatto è che essi abbiano *diversa temperatura*; e così la condizione affinchè abbia luogo passaggio di un liquido fra due vasi comunicanti è che nei due vasi il liquido abbia *diversa altezza*. Se i due corpi hanno la stessa temperatura, o se nei vasi il liquido ha lo stesso livello, non può aver luogo nè passaggio di calore nè passaggio di liquido.

L'elettroscopio a foglie d'oro può accertarci se tra due corpi esiste una differenza di potenziale (abbr.: d. d. p.); basta metterlo successivamente in comunicazione con l'uno e con l'altro; il corpo che presenta maggior divergenza ha maggior potenziale. L'elettroscopio fa l'ufficio del tubo a livello che serve per stabilire la altezza di un liquido in un vaso e del termometro usato per la misura delle temperature.

225. Significato fisico del potenziale. - Unità di potenziale. — La parola *potenziale* è l'abbreviativo della frase *energia potenziale*, perchè il potenziale di un corpo è il lavoro che si deve compiere per elettrizzarlo, lavoro che resta nel corpo allo stato di *energia potenziale*, che può esserci restituita dal corpo durante la scarica.

E come abbiamo convenzionalmente lo *zero* nella scala di misura delle temperature, così abbiamo uno *zero* nella scala di misura dei potenziali. Si conviene di prendere come potenziale *zero* il potenziale del suolo, e la convenzione è giustificata da ciò che un elettroscopio messo in comunicazione col suolo non dà mai alcuna divergenza.

Consideriamo ora due vasi A e B contenenti acqua a diversa altezza e apriamo fra di essi una comunicazione mediante un tubo. Attraverso a questo fluirà l'acqua dal vaso dove l'altezza è maggiore all'altro e il movimento dell'acqua tenderà ad eguagliare le altezze del liquido nei due recipienti. Ma se con un processo qualsiasi otteniamo che, malgrado il passaggio dell'acqua, le altezze nei due vasi rimangano inalterate, l'acqua continuerà regolarmente il suo moto.

In tal caso, se V_A e V_B sono le altezze dell'acqua nei due vasi e se è $V_A > V_B$, dato che in un tempo qualunque dal vaso A al vaso B passi un peso d'acqua M, in base alle nozioni di lavoro acquistate nella Meccanica, l'acqua compie un lavoro L misurabile con la formola:

$$L = M\,(V_A - V_B)\,.$$

Lo stesso lavoro una forza esterna dovrebbe inversamente eseguire per riportare il peso d'acqua M da B ad A.

Analogamente, se due conduttori A e B, presentanti una d. d. p. $V_A - B_B$, vengono messi in comunicazione, durante il passaggio di una quantità M di elettricità dal primo al secondo, verrà eseguito un lavoro:

$$L = M\,(V_A - V_B)\,; \qquad (1)$$

sempre inteso che la d. d. p. dei due conduttori resti inalterata malgrado il passaggio di elettricità.

Dalla formula abbiamo:

$$V_A - V_B = \frac{L}{M}$$

e se $M = 1$

$$V_A - V_B = L\,;$$

cioè *la d. di p. fra due corpi è il lavoro che le forze elettriche eseguiscono mentre dal primo al secondo corpo passa l'unità di elettricità*; o inversamente, *il lavoro che si deve eseguire per portare l'unità di elettricità dal corpo a potenziale più basso all'altro.*

Dall'ultima formola, fatto $L = 1$, otteniamo:

$$V_A - V_B = 1\,;$$

quindi possiamo dire che fra due corpi esiste l'*unità di d. d. p.* se il passaggio dell'*unità di elettricità* dall'uno all'altro eseguisce l'*unità di lavoro*. Convenendo di adottare le unità del sistema pratico, cioè il *joule* come unità di lavoro, il *coulomb* come unità di elettricità, l'*unità di d. d. p. è la d. d. p. che deve esistere fra due corpi affinchè per il passaggio di un coulomb di elettricità dall'uno all'altro venga eseguito il lavoro di 1 joule.* Tale unità di d. d. p. è detta *volta*.

Si dice spesso che un corpo ha il potenziale di V volta, s'intende che V volta è la d. d. p. fra il corpo e la terra.

Il potenziale di un corpo si misura con speciali strumenti detti *elettrometri*, di cui non intendiamo occuparci. Per ora limitiamoci a dire, tanto per avere un'idea meno vaga del valore del volta, che per produrre in un buon elettroscopio una divergenza visibile delle foglie d'oro occorre che lo strumento venga portato per lo meno a 50 volta e gli elettroscopi comuni di scuola almeno a 200 volta.

Nei fenomeni di Elettrostatica ci troviamo in generale in presenza di potenziali valutabili in parecchie centinaia e spesso in parecchie migliaia di volta.

226. Distribuzione della elettricità sui conduttori. — Numerose esperienze facilmente eseguibili mostrano che la carica posseduta da un conduttore isolato si porta esclusivamente sulla sua superficie esterna.

Fra le diverse prove che se ne possono dare diremo solo di quella che si può fare con la *gabbia di Faraday*. È una specie di gabbia formata con rete metallica, con fondo conduttore e posta sopra un sostegno isolante (fig. 357), dentro alla quale si pone un elettroscopio a foglie d'oro, la cui sferetta è in comunicazione colla gabbia stessa.

Mettendola in comunicazione con una sorgente M di elettricità, delle striscioline di carta pendenti all'esterno risultano vivamente respinte, e avvicinando la nocca del dito a un punto della gabbia si possono tirare delle scintille, ma l'elettroscopio non segna la minima divergenza.

Il fatto può essere utilizzato per proteggere un qualsiasi apparecchio da azioni elettriche circostanti. Basta racchiuderlo dentro un involucro che dovrebbe a rigore essere tutto di lamiera metallica, ma che in pratica può semplicemente esser fatto con pareti a rete metallica come la gabbia di

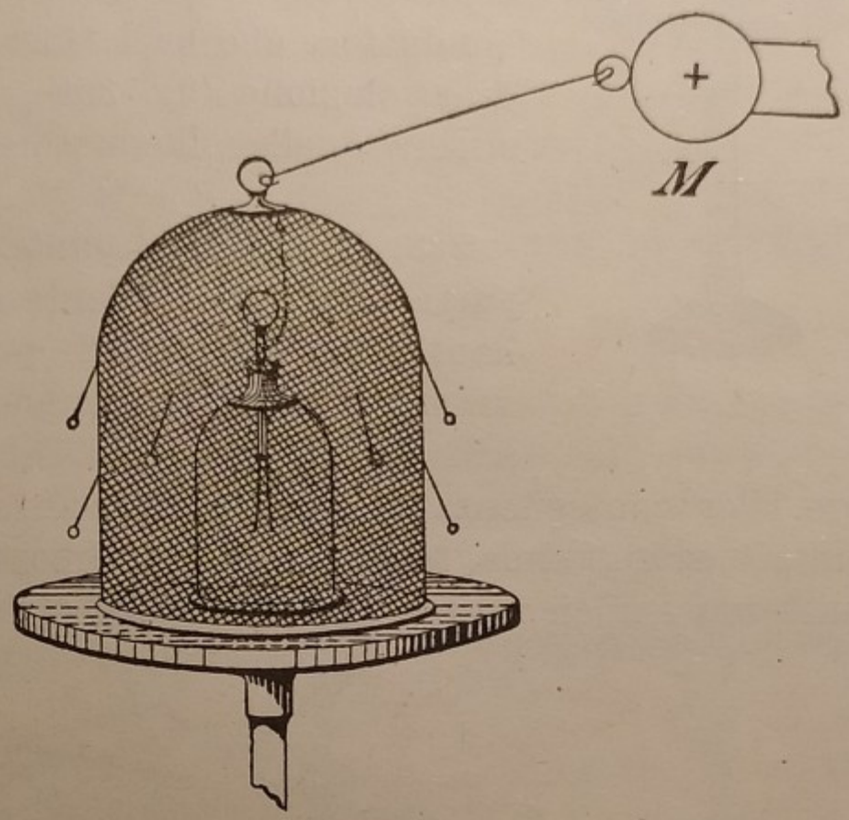


Fig. 357.

Faraday. Questi involucri costituiscono degli *schermi elettrici*, come un involucro di ferro costituiva uno schermo magnetico (212).

227. Densità elettrica superficiale. — Se carichiamo di elettricità una sfera metallica isolata, l'elettricità si porta alla sua superficie, ed è evidente, per ragione di simmetria, che la carica si distribuirà uniformemente sulla superficie stessa. Se M è la carica posseduta dalla sfera, e il suo raggio è r, essendo $4\pi r^2$ l'area della sua superficie, *la quantità δ di elettricità posseduta da ogni unità di tale superficie* sarà il rapporto fra la quantità totale di elettricità e l'area della superficie stessa, cioè:

$$\delta = \frac{M}{4\pi r^2}.$$

La grandezza δ così definita si chiama *densità elettrica superficiale*.

Se invece il conduttore isolato non è una sfera, la densità varia in genere da una regione all'altra del conduttore e riesce *maggiore* nei punti dove la superficie è *più curva*. Se si tratta, ad esempio, di un conduttore che ha la forma di un ellissoide di rivoluzione (fig. 358), la densità ai poli supera quella all'equatore.

Fig. 358.

228. Potere delle punte. — Questo fatto è particolarmente evidente nei conduttori che hanno una punta; nelle punte infatti la curvatura è massima, in modo che su di esse si addensa quasi tutta l'elettricità del conduttore. Per conseguenza la forza elettrica in vicinanza d'una punta è grandissima, tanto che l'aria circostante non offre più resistenza sufficiente per trattenere l'elettricità sulla punta e

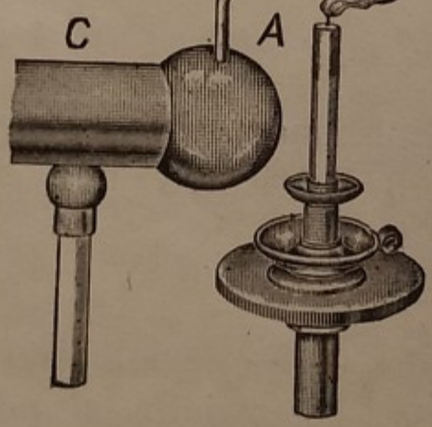


Fig. 359.

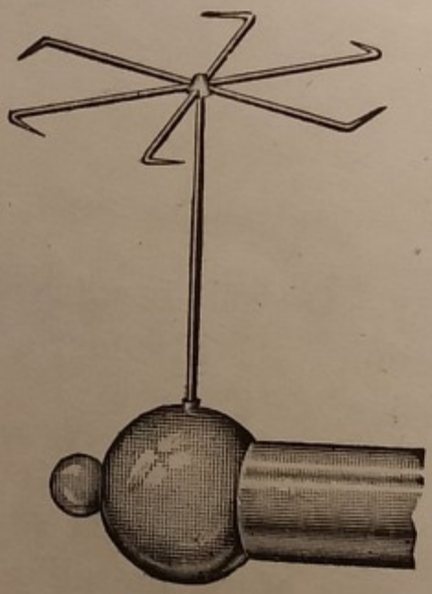


Fig. 360.

l'elettricità ne sfugge disperdendosi nell'aria. In ciò consiste il *potere dispersivo* delle punte.

Il fatto può mettersi in evidenza facilmente: davanti alla punta A del conduttore elettrizzato C (fig. 359) si pone una candela accesa; la fiamma risulta fortemente soffiata dal *vento elettrico* che si verifica davanti alla punta.

L'aria soffiata dalla punta reagisce contro di questa, che tende perciò ad assumere un movimento opposto: lo dimostra l'*arganetto elettrico*, piccolo mulinello metallico colle punte rivolte in uno stesso senso (fig. 360), poggiato per mezzo di un piccolo cappello sopra una punta metallica comunicante con una sorgente di elettricità. In tali condizioni assume un rapido moto di rotazione.

Per mantenere quindi l'elettricità sopra un conduttore, occorre che esso non presenti sulla superficie esterna nè spigoli nè punte, occorre anche che sia spoglio di polvere, i cui granelli, presentanti spigoli, produrrebbero la dispersione della carica.

229. Induzione elettrostatica. — Un conduttore portato in un campo elettrico si elettrizza e tale elettrizzazione che avviene senza strofinio o contatto con altri corpi elettrizzati si dice influenza o meglio *induzione elettrostatica*.

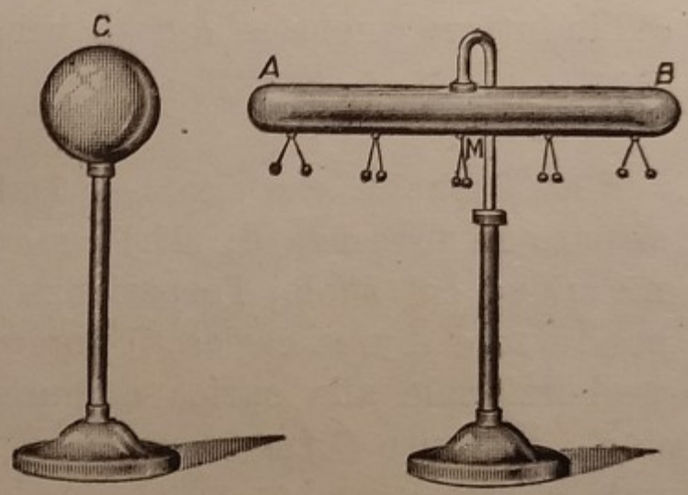


Fig. 361.

Il campo sia prodotto, ad esempio, da una sfera C (fig. 361) carica positivamente, e si ponga un cilindro metallico AB isolato, che porta sospese alcune coppie di pendolini, con un estremo rivolto verso la sfera. Si osserva che i pendolini presentano una divergenza, particolarmente verso le estremità e la divergenza è quasi nulla nelle coppie centrali. Quivi esiste una zona non elettrizzata detta *zona neutra*.

Si osserva inoltre che i pendolini rivolti verso l'induttore C sono respinti da un bastone di ebanite elettrizzato, e vengono invece attratti quelli posti verso l'estremo B; ciò mostra che i primi hanno carica negativa e gli ultimi positiva. Se la sfera induttrice fosse elettrizzata negativamente l'estremità A del cilindro risulterebbe carica positivamente e la B negativa-

mente. Dimodochè si conclude che *la regione del conduttore indotto prospiciente il corpo induttore prende per induzione una carica di segno contrario a quella dell'induttore, nella regione più distante la carica indotta ha lo stesso segno dell'induttore.*

Allontanando l'uno dall'altro i due corpi, o scaricando la sfera C, l'indotto torna subito allo stato neutro.

In conseguenza del fenomeno d'induzione, facendo comunicare col suolo un conduttore soggetto all'influenza di un corpo elettrizzato, esso obbedendo alla regola fondamentale, prende in ogni suo punto uno stato elettrico opposto a quello del corpo induttore, poichè in tali condizioni il conduttore e la Terra formano un unico sistema indotto, la cui linea neutra si trova a distanza assai grande dal corpo. E quindi se, disposte le cose in tal maniera, si toglie la comunicazione dell'indotto colla Terra, il corpo resta carico di nome contrario all'induttore anche se questo venga portato a distanza o scaricato.

230. Capacità elettrica. — Dato un conduttore isolato A situato in presenza di altri conduttori B, C... tutti in comunicazione col suolo, l'esperienza mostra che comunicando al conduttore A una carica, il potenziale che esso acquista riesce proporzionale alla carica comunicatagli, ossia esiste un rapporto costante C fra la carica M e il potenziale V acquistato, vale a dire

$$\frac{M}{V} = C. \qquad (1)$$

Il numero C, definito da questa relazione, misura la *capacità* del conduttore A nelle condizioni specifiche in cui si trova. In altre parole, poichè fatto $V = 1$ dalla formola precedente risulta $C = M$, *la capacità di un conduttore posto in determinate condizioni, è misurata dal numero che esprime la carica che gli si deve comunicare perchè acquisti potenziale uno.*

L'unità di capacità nel sistema teorico è la capacità di un conduttore che acquista l'unità teorica di potenziale (225) ricevendo l'unità teorica di elettricità (222).

L'unità pratica di capacità, detta *faraday* — comunemente si dice *faràd* — è la *capacità di un conduttore che acquista 1 volta di potenziale per ogni coulomb di elettricità che gli si comunichi.* Ma il faràd risulta troppo grande per le misure pratiche, sicchè l'unità usualmente adoperata è il *microfaràd* = 1 milionesimo di faràd.

La teoria dimostra che la capacità di una sfera conduttrice isolata, sola nello spazio, cioè tanto distante da altri conduttori da non esserne influenzata, risulta proporzionale al suo raggio, e che una sfera conduttrice per avere la capacità di 1 faràd dovrebbe avere un raggio di 9 milioni di chilometri. Con un raggio di 9 chilometri avrebbe la capacità di 1 microfaràd; talchè la Terra, considerata come un semplice conduttore, avendo un raggio di circa 6371 chilometri, ha una capacità di $\frac{6371}{9} = 708$ microfaràd circa.

231. Condensatori e leggi della condensazione elettrica. — I *condensatori* sono apparecchi che permettono di accumulare grandi quantità di elettricità su conduttori di piccolo volume senza elevarne di troppo il potenziale.

Un condensatore è un sistema di due conduttori, affacciati e vicini, separati da un isolante qualunque, che nel caso specifico è detto *dielettrico.*

I due conduttori sono detti *armature.*

Per *capacità di un condensatore* si intende la capacità di una delle sue armature quando l'altra è in comunicazione colla Terra.

Un'armatura del condensatore si mette in comunicazione con la sorgente di elettricità, mentre l'altra messa in comunicazione col suolo, acquista per induzione una carica eguale e di segno contrario. La capacità di un condensatore piano è regolata dalle leggi seguenti:

1° *è proporzionale alla superficie delle armature;*

2° *è inversamente proporzionale alla loro distanza;*

3° *è proporzionale alla costante dielettrica della sostanza* (222) *che separa le due armature.*

Dimodochè, volendo ottenere condensatori di grande capacità, bisogna usare armature molto estese, e separarle con una lamina isolante di piccolo spessore e di elevata costante dielettrica. Spesso si usa il vetro.

232. Varie forme di condensatori. — Una forma è quella nota sotto il nome di *quadro di Franklin* (fig. 362), formato di una lastra di vetro sulle faccie della quale si incollano due foglie di stagnola aventi superficie alquanto minori della lastra, sì che tutt'intorno resta una zona di vetro scoperta.

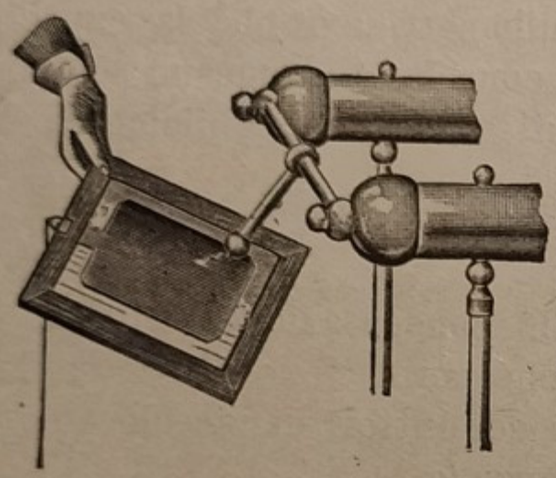


Fig. 362.

Fig. 363.

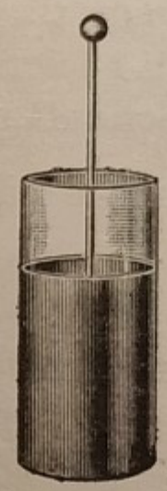


Fig. 364.

Più usata è la forma detta *bottiglia di Leyda*, dal nome della città dove il Cuneus avrebbe nel 1746 fatto la scoperta della condensazione elettrica. Essa è formata da una bottiglia di vetro a largo collo (fig. 363), o meglio da un bicchiere cilindrico (fig. 364), guarnita dentro e fuori di stagnola fino a una certa distanza dall'orlo. L'armatura interna comunica con un'asta metallica che esce fuori e termina con una sferetta.

In alcuni casi particolari si usano anche condensatori piani formati talora di lamine di mica (fig. 365), dello spessore di $0^{mm},1$ circa, sulle due faccie delle quali si deposita per via chimica un sottile strato di argento. Le lamine vengono sovrapposte, e in tal modo fra due lamine successive di mica rimane una doppia foglia di argento f. Si fanno comunicare fra loro da una parte con un conduttore A tutte le lamine di argento di ordine dispari, e dall'altra con B quelle di ordine pari,

In tal maniera si ottengono dei condensatori dell'ordine di 1 microfaràd sotto un piccolo volume.

Per qualche altra applicazione, invece delle foglie di mica si usa carta comune o tutt'al più carta paraffinata, e tra un foglio e l'altro si dispone una foglia di stagnola, di modo che le stagnole d'ordine dispari sporgendo alquanto da una parte e unite fra loro, costituiscono una delle armature, e il sistema delle stagnole pari sporgenti dall'altra parte, l'altra armatura.

In questi condensatori a libro non si possono tuttavia portare le armature a

Fig. 365.

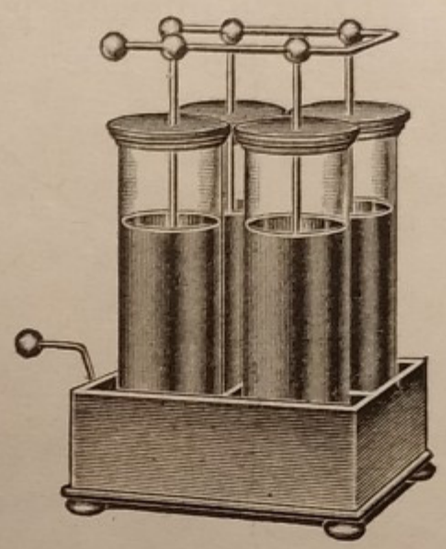


Fig. 366.

una d. d. p. troppo alta, che provocherebbe la scarica delle armature attraverso i fogli isolanti perforandoli, e mettendo l'apparecchio fuori d'uso.

Condensatori di grande capacità e che possono sopportare sulle armature grandi d. d. p. non possono esser fatti se non associando diverse bottiglie di Leyda; si ottengono così le *batterie di Leyda*. Le bottiglie sono messe dentro una cassetta, il fondo della quale è coperto con una lamina di stagnola comunicante con un contatto metallico che sporge esternamente dalla cassetta. Le armature interne delle bottiglie comunicano insieme mediante adatte asticelle metalliche (fig. 366).

233. Elettroscopio condensatore di Volta. — Questo apparecchio, che servì al Volta per le indagini che lo resero immortale, è tanto sensibile da poter indicare dei potenziali dell'ordine di 1 volta posseduti da una *sorgente* di elettricità, quali sono i poli di una pila.

Per trasformare un elettroscopio ordinario in elettroscopio condensatore, basta sostituire al bottone un condensatore formato di due piatti di ottone, semplicemente verniciati alla gommalacca sulle faccie contigue. Il piatto inferiore è avvitato al posto della sferetta e quello superiore vi poggia sopra; così si ha un condensatore di notevole capacità (fig. 367).

Il piatto inferiore posto a contatto colla sorgente, ne assume il potenziale V ricevendone una carica M tale che è $M = CV$, essendo C la capacità del condensatore. Intanto il piatto superiore si tiene in comunicazione col suolo toccandolo con un dito. Se allora si toglie la comunicazione del piatto inferiore colla sorgente e si porta via il piatto superiore, la capacità del piatto inferiore acquista un valore C' che può essere 500 volte inferiore alla precedente; e per conseguenza il potenziale assunto da esso avrà un valore $V' = 500\ V$ in causa della formola (1) del § 230, essendo rimasta inalterata la carica. Così se la sorgente ha il potenziale di 1 volta, sarà $V' = 500$ volta; potenziale più che sufficiente per avere una divergenza notevole nelle foglie.

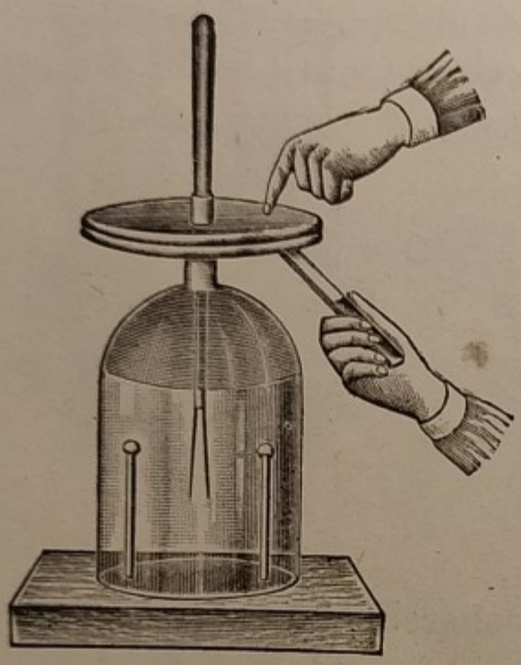


Fig. 367.

Macchine elettrostatiche.

Con le macchine elettrostatiche si ottiene una produzione continua di elettricità a spese del lavoro meccanico. Esse producono sempre quantità eguali di elettricità di segno contrario, che vengono raccolte da due conduttori detti *poli*, rispettivamente *positivo* e *negativo*.

Ne abbiamo due tipi: a *strofinio* e ad *induzione*. Al primo tipo appartiene la macchina di Ramsden, al secondo l'elettroforo di Volta e la macchina Wimshurst.

234. Macchina di Ramsden. — È formata di un grande disco di vetro DD' girevole attorno al suo asse mediante la manovella M (fig. 368).

Durante la rotazione il disco strofina contro due paia di cuscinetti FF, sostenuti da due aste verticali di legno. Due

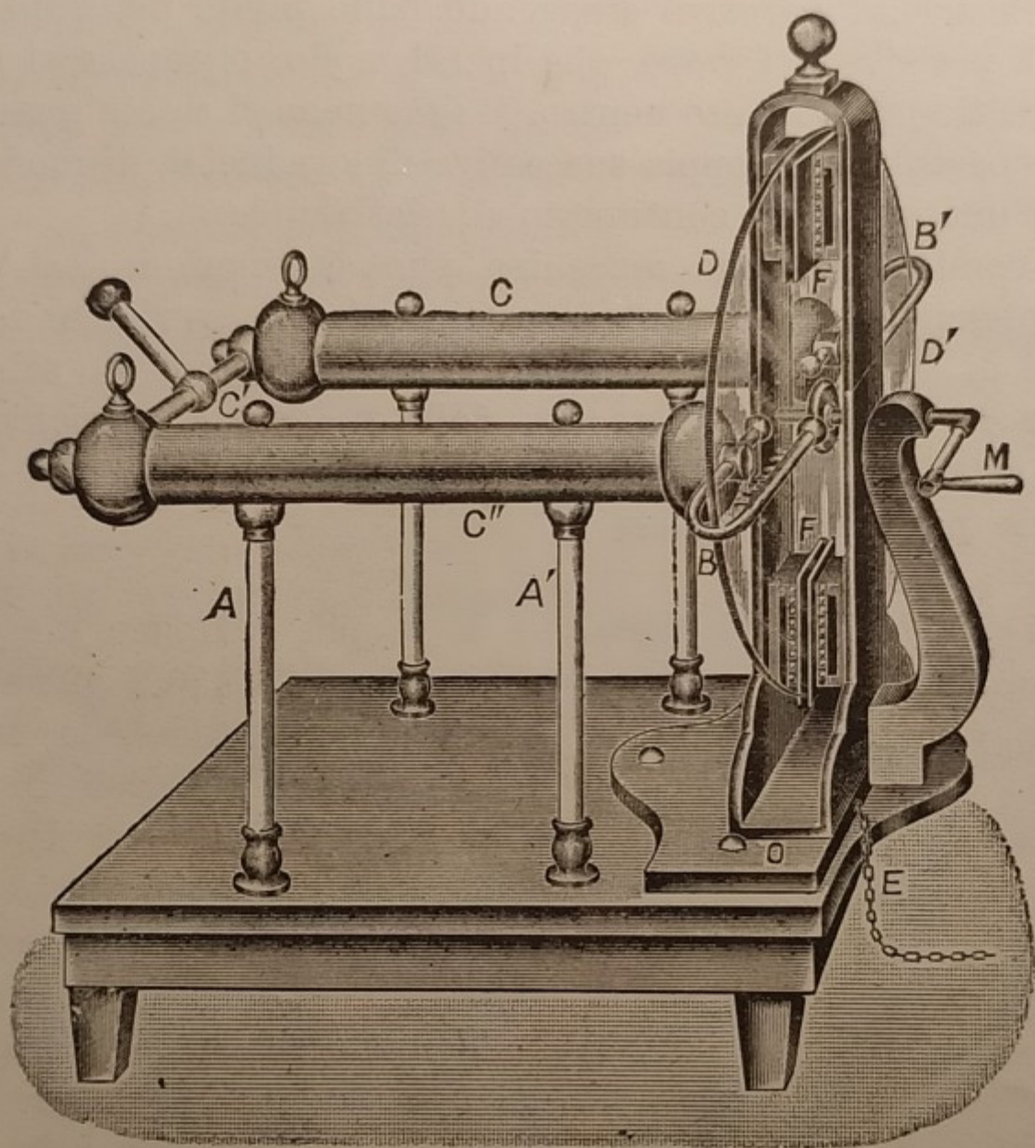


Fig. 368.

grandi conduttori isolati CC'' uniti da una parte con una traversa metallica C' sono posti nel piano orizzontale comprendente l'asse del disco e terminano con due forcelle metalliche BB' dette *pettini*, che sono muniti di punte rivolte verso il vetro senza toccarlo.

Quando si fa girare il disco, il vetro si elettrizza positivamente, per lo strofinio contro i cuscinetti, mentre questi si

caricano negativamente; ma siccome i cuscinetti di solito sono messi in comunicazione col suolo mediante una catenella *E*, l'elettricità negativa si disperde nella terra. Il vetro elettrizzato passa fra i pettini e produce sul conduttore con essi comunicante il fenomeno d'influenza. I pettini si caricano negativamente e il conduttore *CC'C''* positivamente.

L'elettricità negativa sfuggendo dalle punte neutralizza la carica positiva del vetro, che in tal modo, oltrepassati i pettini, si trova allo stato neutro. Il fenomeno si ripete quando il vetro passa fra la coppia successiva di cuscinetti, di modo che si ha uno sviluppo continuato di elettricità.

Il conduttore della macchina può assumere in tal modo un potenziale piuttosto elevato, di modo che avvicinandovi la nocca di un dito se ne possono tirare delle discrete scintille.

Per il buon funzionamento della macchina si richiedono però condizioni favorevoli di ambiente e in particolar modo di aria piuttosto asciutta.

235. Elettroforo di Volta. — È la più semplice macchina ad induzione. Una schiacciata di resina (fig. 369) viene elettrizzata strofinandola o meglio battendola con una pelle di gatto e vi si poggia sopra un disco conduttore detto *piatto* o *scudo* che porta un manico isolante. Messo momentaneamente lo scudo in contatto col suolo toccandolo col dito, lo si solleva mediante il manico isolante e lo si riscontra carico *positivamente*, tanto che se ne può tirare una scintilla. Ripetendo nell'ordine indicato le operazioni, eccettuata l'elettrizzazione della resina che basta fare una volta per sempre, si ottengono sul disco quante si vogliano cariche.

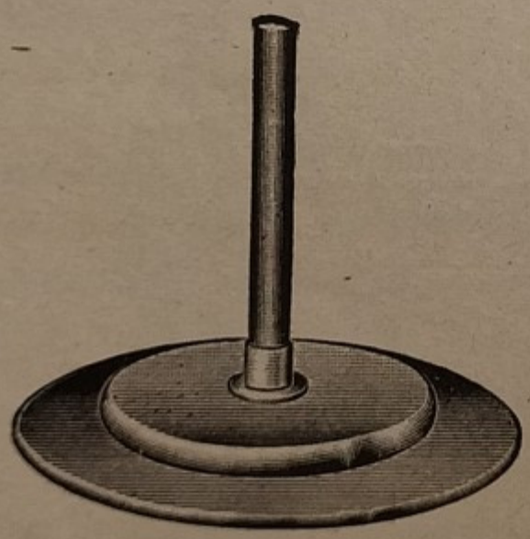


Fig. 369.

Il fenomeno avviene così: lo scudo poggiato sulla resina la tocca per tre o pochi più punti, data l'ineguaglianza delle due superficie a contatto, sicchè lo scudo si elettrizza per

induzione (fig. 370), sulla faccia inferiore positivamente, su quella superiore negativamente. Toccandolo col dito, l'elettricità negativa va al suolo e resta sullo scudo solo la carica indotta positiva, che si distribuisce su tutta la sua superficie quando viene sollevato dalla schiacciata.

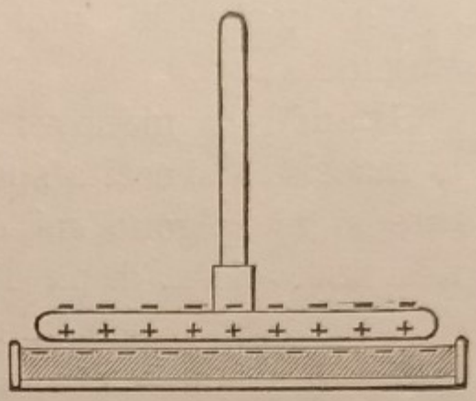


Fig. 370.

L'elettrizzazione dello scudo viene ottenuta non a spese della carica della resina, che rimane inalterata, salvo la solita dispersione lenta che avviene per tutti i corpi elettrizzati, ma a spese del lavoro meccanico che, quando si solleva lo scudo, occorre eseguire per vincere la mutua attrazione tra la carica positiva dello scudo e quella negativa della resina.

236. Macchina Wimshurst. — È la macchina più largamente usata nei laboratori e nelle scuole. Essa si compone di due dischi eguali di vetro o di ebanite, affacciati e vicini, che girano sullo stesso asse orizzontale con velocità eguali e contrarie.

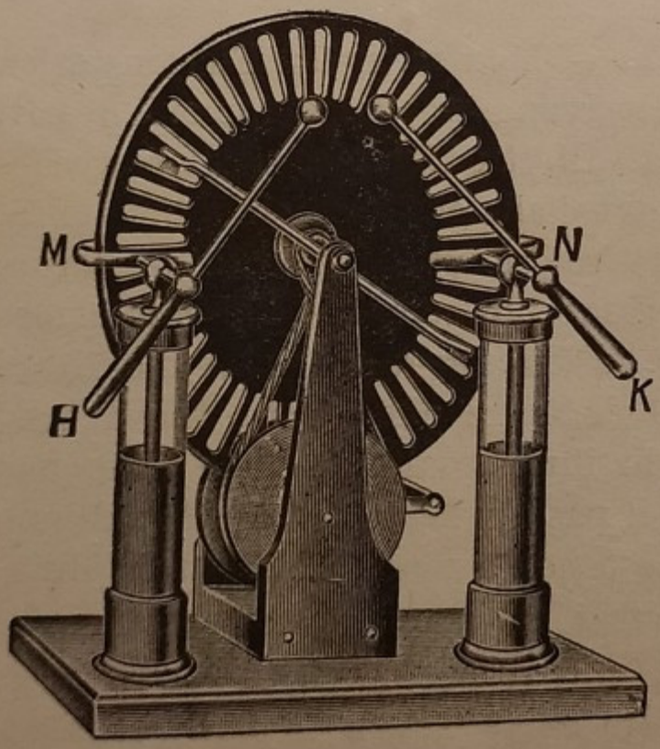


Fig. 371.

Le faccie esterne portano, verso la periferia, incollativi radialmente ed equidistanti, dei settori di stagnola (fig. 371). Due pettini *MN* muniti di una striscia metallica rivolta verso i dischi li abbracciano alle estremità del diametro orizzontale e comunicano con due conduttori *HK* isolati e snodati in modo da poter variare la distanza delle sferette con cui terminano; tali conduttori costituiscono i poli della macchina. Oltre a questi organi la macchina porta infine due

conduttori diametrali, posti di rimpetto alle faccie esterne e inclinati in senso contrario, muniti verso le estremità di leggeri pennellini metallici sfreganti contro le striscie di stagnola.

Girando la manovella, che imprime il moto ai due dischi, la macchina si eccita spontaneamente, e le due elettricità generate si raccolgono sui due poli, che acquistano rapidamente una notevole d. d. p., sì che tra essi si ottiene una rapida serie di ben nutrite scintille.

Nel funzionamento della macchina di Wimshurst vengono eseguiti automaticamente i processi che si compiono nell'elettroforo di Volta; ma una descrizione minuta di tali processi non è nè breve, nè facile, quindi non crediamo opportuno di parlarne.

Elettrodinamica.

237. La corrente elettrica. — Mentre nella Elettrostatica ci siamo occupati quasi esclusivamente dei fenomeni dovuti alla elettricità in equilibrio, nell'Elettrodinamica studieremo i fenomeni dovuti alla elettricità in movimento.

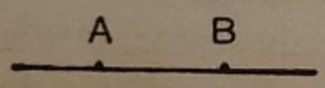


Fig. 372.

Affinchè fra due punti A e B di un corpo, che può essere un semplice filo conduttore (fig. 372), abbia luogo un movimento di elettricità, occorre che esista fra di essi una d. d. p., e se con un artifizio qualunque tale differenza viene mantenuta malgrado il passaggio di elettricità dall'uno all'altro punto, passaggio che tende a rendere nulla tale differenza, si avrà fra i due punti un movimento continuo di elettricità o, come si dice, una *corrente elettrica*.

In relazione alla formola (1) del § 225, se i punti considerati sono mantenuti ad una d. d. p. costante $V_A - V_B$, per il passaggio di una quantità M di elettricità, nel conduttore posto fra i punti A e B, viene eseguito un lavoro

$$L = M (V_A - V_B).$$

E per il principio della conservazione è evidente che tale energia, che *apparisce* nel corpo, deve *sparire* in qualche altro posto.

Or per mantenere tra A e B una d. d. p. e la corrente che ne è la conseguenza, occorre un apparecchio, che chiameremo *generatore*, nel quale si spende, mentre dura la corrente, o energia *chimica*, o energia *termica*, o energia *meccanica*. Noi potremo così dire che nel generatore queste tre forme di energia si convertono in una forma nuova, l'*energia elettrica*, la quale alla sua volta si converte nel conduttore che essa attraversa o in *calore* come avviene nelle *lampade elettriche* e nei *forni elettrici* o in *energia chimica* nei *voltametri* e nella carica degli accumulatori o in *energia meccanica* nei *motori elettrici*, o ancora in altre forme meno comuni.

Ed è appunto grazie alla facilità con la quale si presta come agente intermediario di trasformazione di una forma di energia in un'altra, che l'energia elettrica ha acquistato la sua attuale importanza industriale; invero l'energia elettrica possiede delle qualità che la rendono assolutamente preziosa.

1° La corrente elettrica si può ottenere economicamente utilizzando in particolare delle forze naturali — le cadute d'acqua —.

2° Essa è facilmente trasportabile, a grandi distanze.

3° È la forma di energia che più facilmente si può trasformare in qualsiasi altra forma, con un rendimento molto elevato.

238. Intensità della corrente. — Comunque venga ottenuta, o a spese di energia chimica — colle *pile ordinarie* — o di energia termica — colle *pile termoelettriche* — o di energia meccanica — colle *dinamo* — la corrente elettrica non rivela la sua origine nei suoi effetti. In tutti i casi ha una importanza predominante la così detta *intensità* della corrente, che è la *quantità di elettricità che attraversa una sezione del conduttore nell'unità di tempo.*

Nella tecnica elettrica l'*unità di intensità di corrente* — abbr. *unità di corrente* — è chiamata *ampère.*

Si dice che una corrente costante (1) *ha l'intensità di un ampère quando attraverso ad una sezione del conduttore passa 1 coulomb di elettricità ad ogni minuto secondo.*

Così una corrente ha l'intensità di i ampère se passano i coulomb in *1* secondo. È chiaro allora che se in t secondi passano M coulomb, si ha:

$$M = it, \text{ ossia } i = \frac{M}{t}.$$

239. L'effetto Volta. — Con le macchine elettrostatiche di cui s'è già parlato, si possono ottenere d. d. p. elevatissime tra i due poli isolati; ma appena tra questi si interpone un conduttore, questo è attraversato da una corrente bensì intensa, ma di durata *estremamente breve*, cioè da una *scarica elettrica*, e continuando a girare la macchina, lungo il filo circola una corrente debolissima, perchè ai suoi estremi rimane attiva solo una piccolissima d. d. p. Con le macchine elettrostatiche più potenti, in un filo conduttore, che ne mette in comunicazione i poli, non si riesce ad ottenere correnti superiori a qualche *millesimo* di ampère; mentre se i due conduttori rimangono isolati la d. d. p. fra questi può superare i 50.000 volta.

Fu merito del nostro Volta di aver creato, dopo una serie di celebri esperienze e di argomentazioni ingegnosissime, la *pila* che porta il suo nome, apparecchio meraviglioso, capace di mantenere agli estremi di un conduttore d. d. p. molto grandi, alle quali corrispondono nel filo correnti più intense.

Per intendere però il funzionamento della pila è necessario mettere in chiaro l'*effetto Volta*. Esso consiste nel fatto seguente: se si prendono due pezzi di metallo, per esempio, rame e zinco, inizialmente isolati ed elettricamente neutri, e si pongono a contatto l'uno con l'altro, avviene fra di essi un passaggio di elettricità, in modo che il *rame* si carica *negativamente* e lo *zinco positivamente*; in altri termini, tra i due metalli messi a contatto si determina una d. d. p. Questa differenza è del-

---

(1) Chiameremo *costante* una corrente, se la quantità di elettricità che attraversa una sezione del conduttore è proporzionale al tempo.

l'ordine di 1 volta; ma la si può facilmente mettere in vista con la seguente esperienza. Si prende un elettroscopio condensatore (fig. 373), il cui funzionamento è spiegato nel § 233, e preparata una lamina formata per metà di rame e per metà di zinco saldati insieme, la si sostiene prendendo in mano lo zinco. Il rame della lamina viene messo a contatto col piatto inferiore dell'elettroscopio, mentre si tocca col dito il piatto superiore; si tolgono dopo qualche secondo i contatti, si solleva il piatto superiore e si osserverà una sensibile divergenza nelle foglie dell'elettroscopio con carica *negativa*.

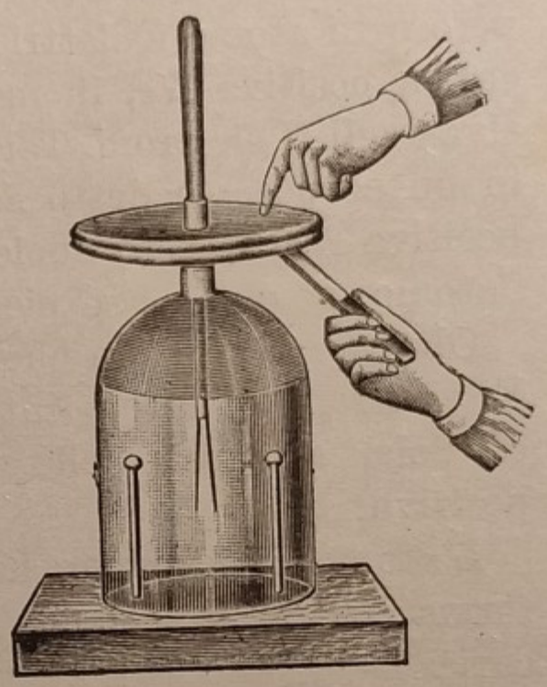


Fig. 373.

240. Spiegazione dell'effetto Volta - Teoria elettronica. — La ragione dell'effetto Volta ci è fornita dalla *teoria elettronica*. Molti fenomeni elettrici ci suggeriscono di considerare lo stato neutro di un corpo dovuto non alla assenza di elettricità, ma alla presenza delle due elettricità positiva e negativa in eguali quantità.

L'atomo non è più ora concepito come il più piccolo elemento della materia, non ulteriormente separabile in elementi più minuti. Le moderne ricerche hanno invece dimostrato che l'atomo dei diversi elementi chimici è costituito da un numero variabile di corpuscoli assai piccoli, che prendono il nome di *elettroni* e *nuclei*.

Gli elettroni sono corpuscoli di estrema piccolezza, aventi una massa eguale a $\frac{1}{1800}$ della massa dell'atomo di idrogeno, che è l'atomo più leggero. Essi sono carichi di elettricità *negativa*, sono anzi ritenuti puri granuli di elettricità negativa. Tutti gli elettroni sono eguali fra loro: hanno tutti la stessa massa e la stessa carica.

Precisamente la massa m di un elettrone è:

$$m = 0{,}901 \,.\, 10^{-27} \text{ grammi-massa};$$

e la sua carica negativa è:

$$e = 4{,}77 \,.\, 10^{-10} \text{ unità teoriche di elettricità (222).}$$

Gli atomi dei diversi elementi chimici possiedono un numero diverso di elettroni, che indicheremo con N; questo numero è detto *numero atomico*; esso varia da 1, nell'idrogeno, a 92, nell'uranio. Per conseguenza gli elettroni di un elemento di numero atomico N avranno una carica negativa Ne. Siccome però ogni atomo è elettricamente neutro, dovrà contenere una carica positiva Ne, in modo da neutralizzare la carica negativa degli N elettroni. Tale carica positiva dell'atomo è raccolta in un corpuscolo detto *nucleo*, il quale dunque ha una carica positiva Ne. Questo nucleo possiede quasi tutta la massa dell'atomo, poichè è ben piccola la massa degli N elettroni.

Oltre a ciò si pensa che nell'atomo il nucleo stia fermo e che gli elettroni gli girino intorno, come i pianeti girano intorno al Sole, a causa della forza che li attira verso il nucleo positivo.

L'atomo di idrogeno ha numero atomico 1, esso dunque è formato da un nucleo con carica $+ e$ e da un solo elettrone con carica $- e$; l'elio ha numero atomico 2, quindi è costituito da un nucleo con carica $+ 2e$ e da due elettroni. L'elemento che ha il massimo numero atomico è l'uranio, per il quale è $N = 92$; esso ha un nucleo con carica $+ 92e$ e 92 elettroni che gli girano attorno.

Occorre poi sapere che in determinate condizioni un atomo può perdere uno o più dei suoi elettroni, per conseguenza, perdendo delle cariche negative, resta carico positivamente e diventa un ente detto *ione positivo*. D'altra parte può anche avvenire che un atomo acquisti uno o più elettroni; esso allora costituisce un *ione negativo*.

Tra gli elementi chimici si riscontrano di quelli che hanno la tendenza ad assorbire elettroni, ed altri che hanno invece tendenza ad abbandonarli. I primi formano quindi dei ioni negativi, e sono quelli che in chimica si chiamano metalloidi; i metalli invece hanno la facilità di perdere elettroni e di formare quindi dei ioni positivi. In modo particolare gli atomi dei metalloidi *monovalenti* hanno la tendenza ad assorbire *un*

solo elettrone, gli atomi dei metalloidi *bivalenti* tendono ad assorbire *due* elettroni, ecc. E analogamente gli atomi dei metalli *mono-*, *bi-*, ecc. *valenti*, hanno tendenza a perdere *uno*, *due*, ecc. elettroni.

Giova ancora notare che negli atomi dei diversi metalli gli elettroni sono legati al nucleo con una diversa attrazione; per es., nello zinco gli elettroni sono legati al nucleo da un'attrazione minore che nel rame; sicchè ponendo a contatto un pezzo di rame e uno di zinco, la prevalenza dell'attrazione esercitata dal rame sugli elettroni, fa sì che alcuni di questi abbandonano lo zinco passando al rame; questo quindi apparirà carico negativamente, mentre lo zinco, per la perdita fatta di elettroni, diventerà positivo. Via via che gli elettroni passano dallo zinco al rame, fra i due corpi si manifesta una d. d. p., che ostacola l'ulteriore passaggio di elettroni dallo zinco al rame, poichè la carica negativa che si forma sul rame respinge gli elettroni dello zinco carichi pure negativamente. Così l'equilibrio è raggiunto e la d. d. p. acquistata dai due metalli costituisce appunto l'effetto Volta.

241. Leggi di Volta sulla elettricità di contatto. — È provato che l'effetto Volta si manifesta non solo fra due metalli, come il rame e lo zinco, ma anche fra due corpi qualunque eterogenei messi a contatto. Il fenomeno è regolato dalle seguenti leggi:

1° *Mettendo a contatto due corpi eterogenei, si desta fra di essi una d. d. p., dipendente solo dalla loro natura e non dalla forma dei corpi e dalla estensione della superficie di contatto, nè dal valore assoluto del potenziale che può avere uno di essi.*

Nel caso speciale del contatto fra rame e zinco, questo metallo acquista un potenziale positivo, il rame negativo, con una differenza di circa 0,75 volta.

2° *In una catena aperta formata di soli metalli la d. d. p. agli estremi è la stessa che si avrebbe tra i due metalli estremi messi direttamente a contatto, indipendentemente dal numero, dalla qualità e dall'ordine dei metalli intermedi.*

Da questa si deduce che *se gli estremi della catena sono fatti collo stesso metallo, non esiste fra loro alcuna d. d. p.*

3° *In una catena chiusa formata di soli metalli, tutti alla stessa temperatura, la forza elettromotrice risultante è nulla;* in altre parole, nella catena chiusa non si ha alcun movimento di elettricità, ossia alcuna corrente.

Il Volta chiamò col nome di forza elettromotrice la causa che origina la d. d. p. fra due corpi messi a contatto. Il Volta inoltre dette il nome di *conduttori di prima specie* ai metalli, e di *conduttori di seconda specie* alle soluzioni di acidi, di basi e di sali.

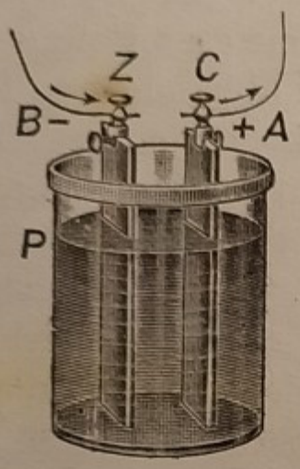


Fig. 374.

242. Elemento voltaico. — La 3ª legge sopra esposta non ha più valore se della catena chiusa fa parte un conduttore di seconda specie. In una soluzione acquosa di acido solforico contenuta in un bicchiere *P* (fig. 374) si immergano due lamine, una di rame *C* e l'altra di zinco *Z*, portanti due morsetti *A* e *B*, ai quali sono uniti due fili di rame. I morsetti indicati costituiscono i *poli* dell'apparecchio, detto *elemento voltaico*. Or mediante speciali misure si trova che la d. d. p. che presentano il rame e lo zinco messi fra loro a contatto mediante la soluzione acidulata, è diversa da quella che presenterebbero se fossero messi a contatto con un metallo (2ª legge del § prec.); tale d. d. p. è di circa 1 volta, col rame però *positivo* e lo zinco *negativo*, mentre per il semplice effetto Volta, come s'è visto, il rame era negativo e lo zinco positivo. Unendo i poli dell'elemento con un filo metallico, per esempio di rame, si ottiene una corrente elettrica per un tempo più o meno lungo.

243. Come funziona l'elemento voltaico. — In questo apparecchio il rame e lo zinco sono a contatto con la soluzione di acido solforico; or è provato che fra un metallo a contatto con una soluzione di un acido, di un sale o di una base, e la soluzione stessa si desta una d. d. p., il metallo caricandosi *negativamente* e la soluzione *positivamente*. Avviene così che ai poli dell'ele-

mento voltaico lasciati isolati, si manifesta una d. d. p. col rame positivo, la quale d. d. p. è la differenza fra le d. d. p. che si hanno fra i singoli metalli e la soluzione. Unendo i poli con un filo metallico si ottiene una corrente permanente, dovuta a un continuo flusso di elettroni dallo zinco al rame attraverso il filo interpolare. Ma per mantenere tale movimento di elettroni occorre la spesa di una certa quantità di energia, che è fornita dalla reazione chimica fra lo zinco e la soluzione acidula. Avviene infatti che le molecole dello zinco si rompono in *ioni positivi* che reagendo con l'acido dànno luogo al rispettivo sale di zinco e in *elettroni* che in modo continuo vengono inviati al rame attraverso il filo interpolare, ed è appunto questo flusso di elettroni che costituisce la corrente. La corrente è dunque mantenuta a spese della energia chimica che si compie fra lo zinco e l'acido.

La d. d. p. che presentano i poli dell'elemento voltaico, lasciati isolati, cioè, come si dice, a *circuito aperto*, è detta *forza elettromotrice* (f. e. m.) dell'elemento.

244. Unione di più elementi in serie - Pila. — Per ottenere notevoli effetti, si usa di solito unire più elementi in *serie*, unendo successivamente il polo positivo del primo elemento col polo negativo del secondo, il positivo di questo col negativo del terzo e così di seguito, di modo che restano liberi lo zinco del primo elemento e il rame dell'ultimo, che formano i *due poli della pila*. Tale disposizione è nota sotto il nome di *pila a corona di tazze* del Volta (fig. 375).

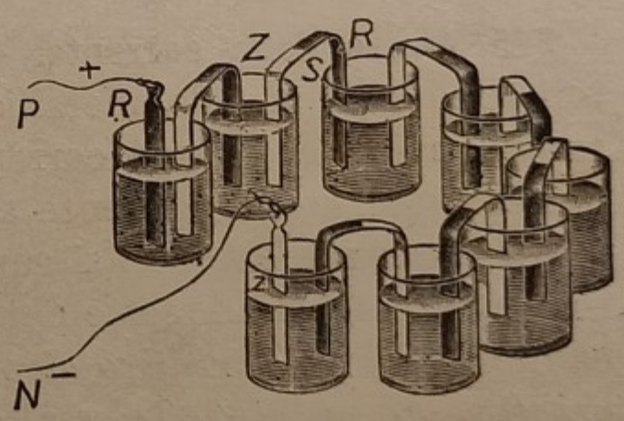


Fig. 375.

Schematicamente la pila è illustrata dalla fig. 376, nella quale ogni elemento è rappresentato da due tratti paralleli di diversa lunghezza e spessore; il più corto e grosso dei quali indica il polo positivo.

Nella stessa figura sono anche notati i valori del potenziale nelle lamine successive. Il polo negativo *B* del 1° elemento

avendo potenziale V, il polo positivo dello stesso elemento ha potenziale $V + a$. Il polo negativo del 2° elemento ha lo stesso potenziale $V + a$, e il polo positivo del 2° elemento potenziale $V + 2a$, e così di seguito, in modo che, se n è il numero degli elementi, il potenziale del polo positivo A dell'ultimo è $V + na$. Vale a dire *ai poli della pila si manifesta una d. d. p. propor-*

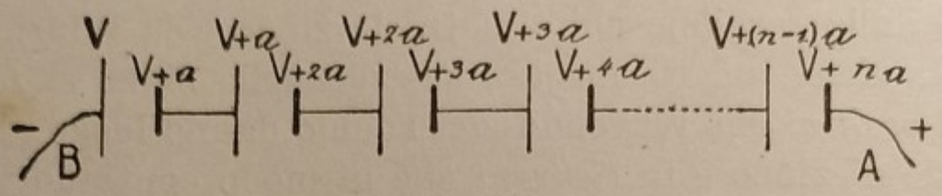


Fig. 376.

zionale al numero degli elementi di cui è formata, poichè tra i poli di ciascun elemento si stabilisce una d. d. p. a qualunque sia il loro stato elettrico preesistente, e ciò in dipendenza della 1ª legge enunciata nel paragrafo 241.

Il valore *assoluto* del potenziale a ciascuno dei poli può variare secondo le condizioni di isolamento della pila, quello che rimane fisso è la d. d. p. ai poli stessi.

245. Senso della corrente. — Se i due poli di una pila si uniscono con un filo metallico, i loro potenziali tendono a eguagliarsi, e si ha una corrente attraverso il conduttore che unisce i poli e una corrente anche dentro la pila.

Alla corrente che così si genera si è convenuto di assegnare un *senso*, cioè, si ammette che nel conduttore che unisce i poli cammini *dal polo positivo al polo negativo* e dentro la pila, *dal negativo al positivo*. In realtà le cose sono diverse, poichè sappiamo che la corrente nel filo interpolare consiste nel movimento di elettroni (243) dallo zinco verso il rame; tuttavia si resta ancora fedeli alla vecchia convenzione.

246. La pila a colonna. — È il primo modello costruito dal Volta, sostanzialmente identico a quello or ora descritto. In essa infatti la soluzione di acido solforico imbeveva un disco di panno posto fra due dischi uno di rame e l'altro di zinco.

Sopra una base isolante era posto un disco di rame *Cu* (fig. 377), sopra questo il disco di panno *P* inzuppato di acqua acidulata e sopra questo un disco di zinco *Zn*; poi un altro disco di rame, un disco di panno, un disco di zinco, e così di seguito.

La successione finisce in alto con un disco di zinco, al quale è unito un filo di rame *A*, che forma il polo *negativo* della pila, mentre un altro filo di rame *B* unito al primo rame ne forma il polo *positivo*.

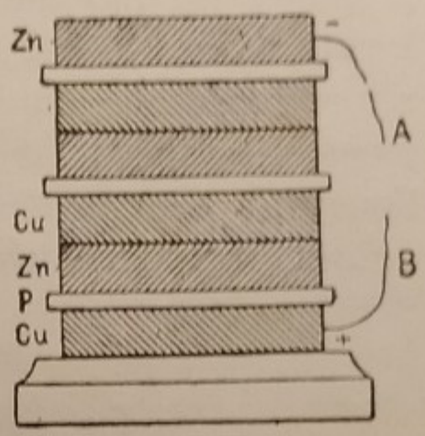


Fig. 377.

Alla pila a corona di tazze il Volta ricorse pensando di eliminare un grave difetto che riscontrò subito nella forma primitiva a colonna, cioè a dire, il rapido indebolimento e la rapida cessazione della corrente, che egli attribuiva ai filetti liquidi che colavano lungo i fianchi della pila per effetto della pressione a cui erano soggetti i dischi di panno. Tali filetti liquidi, perchè conduttori, stabilivano una comunicazione fra gli elementi, vale a dire formavano delle correnti parziali a detrimento della corrente principale.

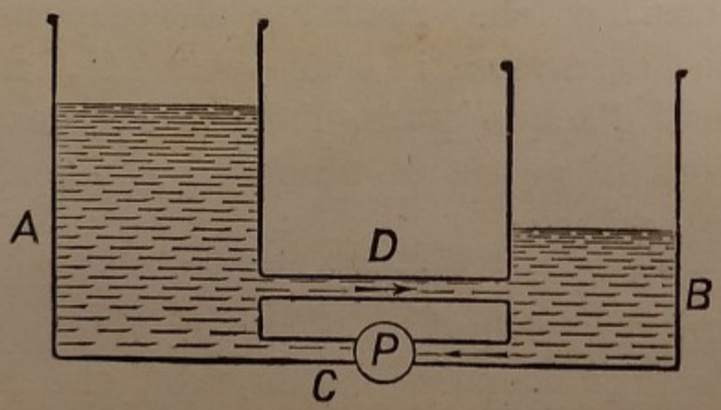


Fig. 378.

Ma anche nella forma a corona di tazze la corrente s'indebolisce egualmente, per cause che investigheremo fra breve (257).

247. Modello idraulico della pila. — Il funzionamento della pila può spiegarsi col seguente paragone idrodinamico. Due vasche *AB* sono in comunicazione con un tubo *C* nel quale è posta una pompa *P* che tende a spingere l'acqua da *B* ad *A* (fig. 378). Se la pompa non funzionasse ma servisse semplicemente per chiudere il tubo *C*, nei due vasi si conserverebbe inalterata la differenza di livello iniziale, senza alcun movimento di liquido: è questa la pila a circuito aperto. Supponiamo

ora di aprire una comunicazione diretta fra A e B mediante il tubo D e di mettere in azione la pompa; l'acqua passerà da A a B in modo continuo, perchè la pompa riportando l'acqua da B ad A, mantiene in A un livello costantemente più elevato. Si ha così una circolazione continua dell'acqua, che corrisponde alla corrente elettrica che la pila produce quando si uniscono i suoi poli con un filo metallico. Nel modello idraulico questo filo è rappresentato dal tubo D, i recipienti A e B corrispondono rispettivamente alla lastra di rame e a quella di zinco; l'energia meccanica spesa per mantenere in moto la pompa, rappresenta l'energia chimica che compiendosi fra lo zinco e l'acqua acidulata, mantiene la corrente.

La corrente negli elettroliti.

I conduttori metallici solidi e anche il mercurio, non subiscono alcuna alterazione per il passaggio della corrente. Gli altri liquidi possono dividersi in due categorie: 1ª liquidi che si lasciano attraversare dalla corrente, quali le soluzioni di acidi, di sali e di basi, e che risultano decomposti; 2ª liquidi che non sono attraversati dalla corrente, nè decomposti; sono tra questi l'acqua pura, l'alcool, l'essenza di trementina, e le soluzioni in acqua di numerosi composti organici: alcool, etere, zuccheri, ecc.

La decomposizione operata dalla corrente si dice *elettrolisi*, e la sostanza decomposta, *elettrolito*. *Elettrodi* vengono chiamate le lamine conduttrici immerse nel liquido, che vi portano la corrente, e in particolar modo *anodo* la lamina che è unita al polo positivo della sorgente e *catodo* quella unita al polo negativo. L'apparecchio in cui si effettua il fenomeno si chiama *voltametro*.

248. Dissociazione elettrolitica. — Per una giusta comprensione dei fenomeni elettrolitici è opportuno esporre anzitutto l'ipotesi della *dissociazione elettrolitica*, dovuta allo svedese Arrhenius. Questa ipotesi audace e geniale ammette che nelle soluzioni acquose di alcuni composti, come gli acidi, i sali e

le basi, la disgregazione non si arresti alla molecola, ma che alcune di queste si scindano in parti, dette *ioni*.

Prendiamo in considerazione il comune sal di cucina o cloruro di sodio, $NaCl$; la molecola di questo composto è formata dall'unione di due ioni, uno di sodio carico di elettricità positiva, l'altro di cloro carico di una eguale quantità di elettricità negativa. I due ioni sono legati nella molecola dalla mutua attrazione delle loro cariche opposte, regolata dalle note leggi di Coulomb (222), e la forza che li avvince è notevolmente grande in ragione della loro piccolissima distanza. Ma quando la molecola del cloruro di sodio viene immersa nell'acqua, sostanza che possiede una costante dielettrica (222) 80 volte superiore a quella dell'aria, la mutua attrazione tra i due ioni diviene 80 volte minore, cioè non più sufficiente per tenerli uniti. I due ioni per conseguenza risultano liberi e vagano nell'acqua ciascuno per conto proprio. In ciò consiste il fenomeno della *dissociazione elettrolitica*.

Notisi però che non tutte le molecole riescono dissociate, ma solo una percentuale, che può in certi casi essere anche elevatissima, a seconda delle diverse circostanze.

La rottura della molecola di cloruro di sodio in ioni può essere schematizzata come segue

$$NaCl \rightarrow Na^{+} + Cl^{-}.$$

Molti altri composti seguono il comportamento del cloruro di sodio, e in generale tutti gli acidi, i sali e le basi, che costituiscono gli elettroliti.

Ora si comprende che cosa succede quando si immerge in una soluzione di cloruro sodico due elettrodi mantenuti da una sorgente ad una certa d. d. p. Si constata che la corrente passa in circuito, poichè i sodioni Na^{+} vengono attratti dal catodo e respinti dall'anodo, mentre i clorioni Cl^{-} si muovono verso l'anodo, perchè attratti da questo e respinti dal catodo.

Il meccanismo della corrente negli elettroliti è perciò diverso da quello che si compie in un conduttore metallico; in questo la corrente consiste in movimento, in un determinato senso, di semplici elettroni, negli elettroliti invece consiste nel duplice movimento, nei due versi, di ioni carichi di segno contrario.

249. Regola fondamentale della elettrolisi. — L'elettrolisi di una soluzione acquosa di un acido, di un sale o di una base obbedisce alla seguente regola:

l'idrogeno dell'acido e il metallo del sale o della base si portano all'elettrodo negativo, il resto della molecola al positivo.

Il fatto è spiegato dallo schema che segue

$$\begin{array}{lll} HCl & \rightarrow H^{+} & + Cl^{-} \\ CuSO_4 & \rightarrow Cu^{++} & + SO_4^{--} \\ AgNO_3 & \rightarrow Ag^{+} & + NO_3^{-} \\ NaOH & \rightarrow Na^{+} & + OH^{-} \end{array}$$

I segni + e — indicano una carica positiva o negativa eguale quantitativamente alla carica elementare *e* di un elettrone (240).

250. Azioni secondarie. — Non si deve tuttavia credere che ai due elettrodi appariscano sempre liberi i due ioni, poichè frequentemente tali ioni dànno luogo ad *azioni secondarie* reagendo col liquido o cogli elettrodi. Per averne una idea prendiamo un tubo ad **U** (figura 379) e poniamovi una soluzione di solfato neutro di sodio, Na_2SO_4, aggiungendo alla soluzione qualche po' di tintura rosa di tornasole. Facendo passare la corrente mediante due elettrodi di platino, si vede il liquido diventare rosso all'elettrodo positivo e azzurro all'altro. La scomposizione del solfato neutro di sodio avviene secondo la regola precitata:

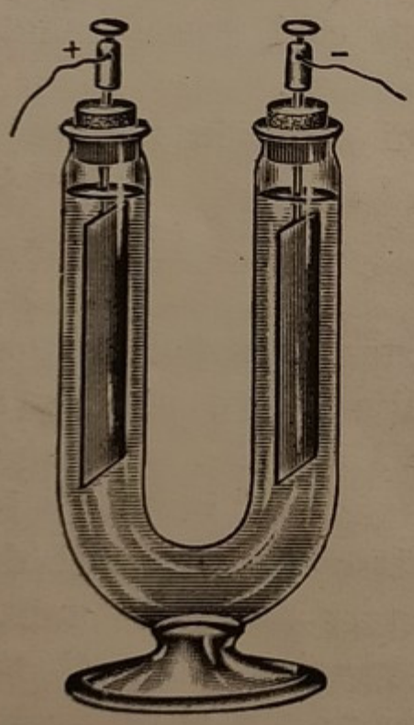


Fig. 379.

$$Na_2SO_4 \rightarrow 2Na^{+} + SO_4^{--} \quad (1).$$

Ma nessun ione rimane libero: i due ioni $2Na^{+}$ sottraggono a due molecole d'acqua due idrossilioni $2OH$ e si combinano con questi formando due molecole di idrato sodico $NaOH$

$$2Na^{+} + 2OH^{-} \rightarrow 2NaOH.$$

Contemporaneamente il solfatione SO_4^{--} della reazione (1) sottrae a una molecola d'acqua due idrogenioni $2H^+$ e combinandosi con questi forma una molecola di acido solforico

$$SO_4^{--} + 2H^+ \rightarrow H_2SO_4.$$

L'idrato sodico che si forma attorno al catodo rende azzurra la tintuta di tornasole, e l'acido solforico, formantesi attorno all'anodo, la arrossa.

Fin qui abbiamo considerato il caso che i ioni reagiscano coll'acqua della soluzione; ma può anche avvenire che essi reagiscano cogli elettrodi. Ciò si verifica, per esempio, nella elettrolisi dell'acido cloridrico con elettrodi di platino; in tal caso l'idrogeno si sviluppa liberamente all'elettrodo negativo, ma il ione Cl^- reagisce coll'anodo di platino formando il rispettivo cloruro.

Analogamente, se si elettrolizza una soluzione di solfato di rame con elettrodi di rame, il ione rame si deposita allo stato metallico sul catodo, e il ione SO_4^{--} reagisce col rame che fa da anodo, ripristinando la molecola del solfato di rame della soluzione. In ultimo si riscontrerà un aumento di peso dell'elettrodo negativo e un'eguale diminuzione di peso del positivo; la soluzione rimane inalterata. Ne vedremo fra poco delle importanti applicazioni.

251. Elettrolisi dell'acqua. — Il primo fenomeno di elettrolisi scoperto da Carlisle e Nicholson nel 1801, fu la così detta *elettrolisi dell'acqua* che si può mostrare in lezione col semplice voltametro della figura 380.

Esso è formato di un vaso di vetro il fondo del quale è attraversato da due lamine o fili di platino A e B saldati nel vetro o fissati con mastice isolante, che esternamente sono uniti ai poli della sorgente. Il vaso contiene dell'acqua acidulata con acido solforico e due provette graduate di vetro C e D, piene della stessa soluzione, ricoprono i due elettrodi.

Appena chiuso il circuito si scorgono delle numerose bollicine gassose staccarsi dagli elettrodi e raccogliersi alla sommità

delle provette di vetro. I due gas raccolti sono gli elementi dell'acqua, l'*idrogeno* e l'*ossigeno*, e il primo, che si raccoglie nella provetta che copre il *catodo*, mantiene costantemente un volume doppio dell'altro.

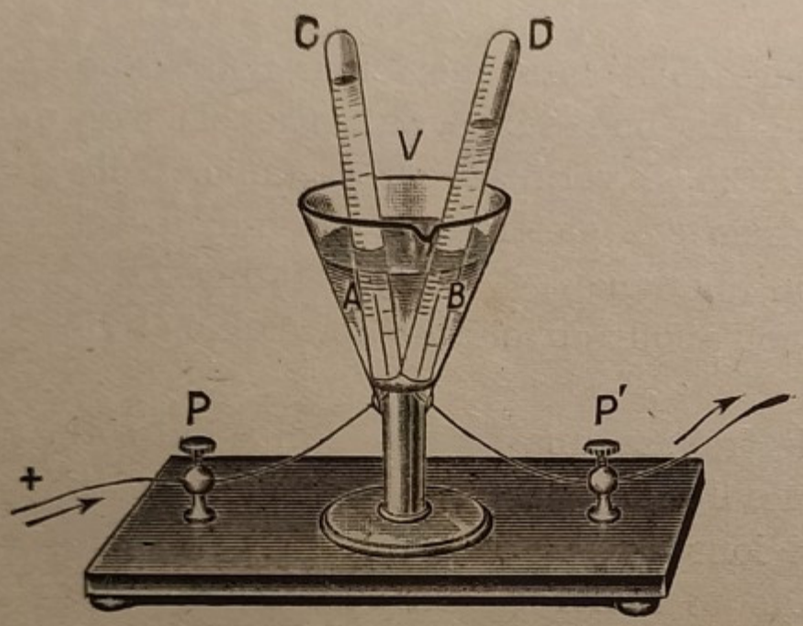


Fig. 380.

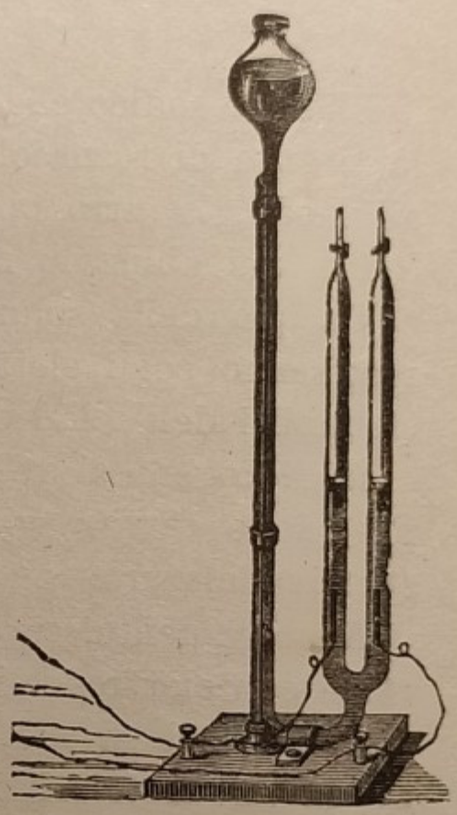


Fig. 381.

Più comodo è il *voltametro di Hoffmann* (fig. 381), costituito di tre tubi di vetro fra loro comunicanti. I due a destra, muniti in alto di chiavette e graduati, portano in basso i due elettrodi, il terzo porta un serbatoio in alto per raccogliere il liquido spostato dai gas che si raccolgono nei due primi tubi.

252. Leggi della elettrolisi. — Esposto così l'andamento qualitativo dei fenomeni, vediamo ora le relazioni numeriche fra le quantità di sostanze liberate agli elettrodi e la quantità di elettricità impiegata. Valgono in proposito le leggi seguenti scoperte da Faraday nel 1833.

1° *La massa di un dato elettrolito decomposto, e quindi anche le masse delle sostanze liberate agli elettrodi, sono proporzionali alla quantità di elettricità che attraversa il voltametro.*

Si è riscontrato che 1 coulomb di elettricità, che attraversa un voltametro ad acqua, libera al catodo una massa di idrogeno eguale a $\frac{1}{96430}$ di grammo circa; quindi per liberarne 1 grammo occorrono circa 96430 coulomb.

2° *Le masse dei vari ioni liberati dalla stessa quantità di elettricità sono proporzionali agli equivalenti chimici dei ioni stessi.*

Per intenderci, riteniamo che *equivalente chimico* di un ione sia la massa di detto ione che può entrare in combinazione o può sostituirsi con la massa uno di idrogeno; e lo si ottiene dividendo il peso atomico M per la valenza n dell'elemento o del ione in esame. L'equivalente chimico dell'ossigeno è $16:2=8$; quello del cloro $35,5:1=35,5$; dell'argento $107,88:1=107,88$; del ione SO_4^{--}, che è bivalente, $96:2=48$; numeri questi che risultano ritenendo eguale ad uno il peso atomico dell'idrogeno.

Per conseguenza 1 coulomb di elettricità mette in libertà $\frac{1}{96430}\times 8$ grammi di ossigeno; $\frac{1}{96430}\times 35,5$ grammi di cloro; $\frac{1}{96430}\times 107,88 = 0,001118$ grammi di argento, ecc.

253. Ampère legale o internazionale. — Approfittiamo delle leggi ora esposte per definire *l'unità di intensità* di una corrente, detta *ampère legale* o *internazionale*. Essa è *l'intensità* di *una corrente costante che fatta passare in un voltametro a nitrato di argento, montato secondo certe prescritte condizioni, deposita sul catodo milligrammi 1,1183 di argento in un minuto secondo.*

Questa unità è la stessa che meno concretamente avevamo definita nel § 238.

254. Affinamento elettrolitico del rame - Elettrometallurgia. — I metalli si possono facilmente separare dalle soluzioni dei loro sali.

Basta far attraversare la soluzione da una corrente di adatta intensità, usando degli elettrodi convenienti.

Tale è il processo per ottenere in modo particolare il *rame elettrolitico*, che è rame chimicamente puro usato nell'industria elettrica per ragioni che esporremo fra non molto. Per darne un'idea, supponiamo di avere delle lastre di rame ordinario, e adoperiamole come anodo per elettrolizzare del solfato di rame, adoperando come catodo delle sottili lamine di rame puro. Al passaggio della corrente si ha un deposito del rame puro della soluzione sulle lamine che fungono da catodo, mentre la soluzione manterrà un grado di concentrazione costante per la continuata ricostituzione del solfato, che avviene, com'è noto, per l'azione dei ioni SO_4 — — sul rame impuro dell'anodo. Alla fine le lamine anodiche si distruggono, le impurità cadono sul fondo della vasca, e simultaneamente si ottiene un trasporto di rame puro sulle lamine del catodo.

Tutti i metalli si possono preparare coll'elettrolisi dai loro sali, fusi o disciolti. Industrialmente, il processo riesce economico soltanto per alcuni, in particolare per il magnesio e l'alluminio.

Quest'ultimo si prepara sottoponendo all'elettrolisi con elettrodi di carbone speciale la criolite fusa, addizionata con cloruro sodico che ne facilita la fusione. In vicinanza dell'anodo si aggiunge in modo continuo dell'allumina, che combinandosi col fluoro, che tende a svilupparsi, dà del fluoruro d'alluminio assai più fusibile dell'allumina. La vasca è in ferro e funziona da catodo; così si deposita sulle pareti della vasca uno strato di alluminio che preserva il ferro, e l'alluminio, messo in libertà dalla corrente, si raccoglie sul fondo della vasca fuso, in grazia della temperatura di circa 1000° a cui è mantenuto il bagno.

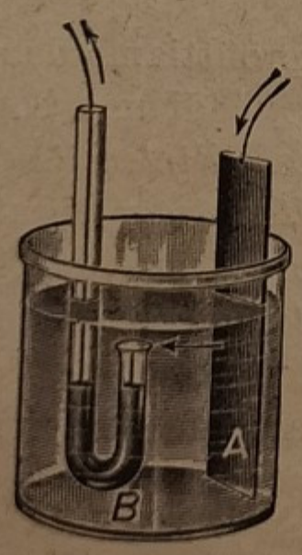


Fig. 382.

Se poi si vogliono ottenere separati i metalli alcalini dai loro sali, basta impedire la reazione secondaria di tali metalli coll'acqua (250),

ciò che si ottiene usando un catodo di mercurio. La prova si può fare coll'apparecchio indicato dalla fig. 382. Si produce l'elettrolisi di una soluzione di solfato sodico, usando un anodo di platino *A* e mettendo in un tubo ricurvo *B* del mercurio nel quale pesca un filo di platino collegato al polo negativo della pila. Il sodio, liberato dal passaggio della corrente, forma col mercurio un amalgama, da cui si può separare operandone la distillazione in presenza di un gas inerte.

Con un procedimento simile il Davy nel 1806 per la prima volta ottenne liberi il potassio e il sodio.

255. Galvanostegia. — È un'industria che ha per scopo di depositare sopra degli oggetti metallici un sottile strato ben aderente di metalli preziosi, quali l'argento e l'oro, o poco ossidabili, come il nichel.

L'oggetto da ricoprire, che deve essere prima di tutto accuratamente pulito, perchè il deposito avvenga ben aderente e in tutti i punti, si sospende in una soluzione di un sale del metallo di cui si vuol ricoprire, in modo che funzioni da catodo.

Per l'argentatura e la doratura, il bagno è una soluzione di cianuro d'argento o d'oro sciolti in una soluzione di cianuro potassico; per la nichellatura si usa una soluzione di solfato doppio di nichel e d'ammonio. Da anodo funziona una lamina del metallo che si vuol depositare.

Gli oggetti tolti dal bagno presentano una superficie opaca, occorre perciò lucidarli. Preparati con questo sistema si trovano oggi in commercio oggetti da tavola, in particolar modo posaterie, vassoi e simili, che in sostanza sono di pakfong fortemente argentato e talora dorato.

La nichellatura è anche comunissima, e la si opera per pezzi da biciclette, automobili, ecc.

256. Galvanoplastica. — Con questa operazione si riproducono degli oggetti depositando elettroliticamente un metallo su forme adatte.

Si tratti, per esempio, di riprodurre una medaglia o una statua. Occorre prima ottenere la forma, che si prepara in due o più pezzi a seconda dell'oggetto, premendovi sopra della cera o della guttaperca rammollite col calore. I pezzi, staccati dopo il raffreddamento, vengono resi *conduttori* della corrente, ricoprendoli con una finissima spazzola di uno strato di grafite. Oggi si usa anche metallizzare le forme spruzzandovi contro un getto di vapore metallico ottenuto con speciale processo.

Comunque l'operazione sia stata eseguita, le forme *M* vengono immerse in una soluzione di solfato di rame, acidulata con acido solforico, facendole funzionare da catodo e per anodo

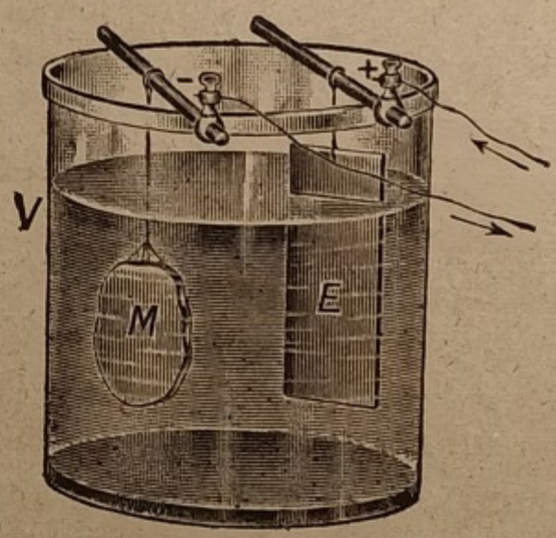


Fig. 383.

si usa una lamina di rame *E* (fig. 383). Se la corrente ha una intensità appropriata, intensità che viene indicata nei trattati speciali, il rame della soluzione si deposita sulla forma in massa compatta, riempiendone i più piccoli dettagli, mentre la lamina funzionante da anodo subisce, per reazione coi ioni SO_4, la sorte già nota.

Lo strato depositato sulla forma si può staccare quando ha raggiunto uno spessore conveniente.

Così si riproducono medaglie e monete rare, capolavori d'incisione, e anche statue. Anzi vere statue si possono così ottenere da modelli in gesso: la *Statua della Libertà* che illumina il porto di New-York, alta 42 metri, venne appunto ottenuta colla galvanoplastica.

I dischi dei fonografi vengono stampati mediante un disco metallico ottenuto galvanoplasticamente dal disco originale.

Molte matrici per la stampa dei francobolli e delle carte-valori sono pure ottenute collo stesso sistema.

257. Polarizzazione - Pila Leclanché. — Nella pila di Volta quando il circuito vien chiuso, ossia quando i poli vengono riuniti mediante un filo di rame, si manifesta una corrente che, secondo il senso convenuto (245), va attraverso il filo dal rame verso lo zinco e all'interno dallo zinco al rame. La corrente che attraversa la soluzione consiste, come s'è detto, in un duplice movimento di ioni, gli idrogenioni, $2H^+$, e i solfationi, SO_4^{--}. L'idrogeno si porta sul rame che funziona da catodo e il ione SO_4^{--} si porta sullo zinco che funziona da anodo. Il ione SO_4^{--} intacca lo zinco trasformandolo nel rispettivo solfato che passa in soluzione e lo zinco si consuma. Di guisa che la corrente nella pila di Volta dovrebbe teoricamente continuare fino a consumazione totale dello zinco.

Si osserva invece che la corrente acquista in un tempo brevissimo un valore assai piccolo, ciò che rappresenta un grave difetto. L'indebolimento della corrente è dovuto al così detto *fenomeno di polarizzazione*, che ha origine dall'afflusso dell'idrogeno verso il rame, come poco sopra è stato detto. Di tale idrogeno la massima parte si sviluppa in forma di piccole bolle, ma una parte aderisce al rame, producendo una speciale modificazione, che ha per effetto di generare una forza *controelettromotrice*, cioè di segno opposto a quella della pila e che si oppone quindi al passaggio della corrente.

Per evitare la polarizzazione si costruirono dopo quella di Volta altri tipi di *pile a depolarizzante*, nelle quali lo strato di idrogeno che aderisce al rame viene ossidato e trasformato in acqua mediante adatte sostanze che circondano la lastra di rame. In alcune di queste pile il rame è sostituito da una lastra o cilindro di carbone speciale che funziona da polo positivo, mentre il polo negativo è sempre formato da una lastra di zinco.

Le pile hanno però oggi delle applicazioni assai limitate; la preferita è la *pila Leclanché*, l'unica che descriviamo.

In questa pila troviamo un vaso di vetro esterno — originariamente a sezione quadrata — (fig. 384), contenente una soluzione di cloruro d'ammonio (NH_4Cl), nella quale è immerso un bastone di zinco. Nell'interno, contenuta in un vaso poroso, è posta una lamina o cilindro di carbone, circondato da una miscela, in piccoli pezzi, di biossido di manganese (MnO_2) e di carbone.

Le reazioni si possono così riassumere: per ogni due molecole di sale ammoniaco entra in azione un atomo di zinco, dando luogo a cloruro di zinco ($ZnCl_2$), ammoniaca ($2NH_3$) libera e a due ioni di idrogeno ($2H+$), in presenza dei quali il biossido di manganese, colla perdita di un atomo di ossigeno per ogni due molecole, si trasforma in sesquiossido (Mn_2O_3).

Fig. 384.

È una pila eccellente, in cui però la depolarizzazione è alquanto lenta, epperò rende buoni servizi nelle applicazioni in cui è chiamata a dare corrente ad intervalli, separati da lunghi periodi di riposo come avviene nei campanelli elettrici.

Modificazioni più o meno felici della Leclanché sono tutte quelle pile, che sotto i nome improprio di *pile a secco*, vediamo oggi in commercio, nelle quali il liquido viene immobilizzato per mezzo di sostanze gelatinose o imbevendolo in segatura, gesso e simili. Due o tre di tali elementi di piccole dimensioni, uniti in serie, servono per le lampadine tascabili.

L'elemento Leclanché ha una forza elettromotrice, ossia una d. d. p. ai poli lasciati isolati, cioè non uniti con un conduttore esterno, di 1,4 volta. Le piccole batterie tascabili, che servono ad alimentare delle piccole lampade a incandescenza son formate di 3 elementi in serie (244) e quindi hanno una forza elettromotrice di $1,4 \times 3 = 4,2$ volta.

258. Accumulatori elettrici. — Nelle pile elettriche l'energia per mantenere la corrente è fornita dalla reazione chimica per cui lo zinco si trasforma in solfato. Quando la lastra di zinco è

completamente consumata, occorre cambiarla e rimettere anche la soluzione nelle primitive condizioni. Negli accumulatori invece la corrente è ancora fornita a spese di reazioni chimiche che si compiono nel loro interno, ma quando sono scarichi, non occorre cambiare le lastre. Basta farli attraversare da una corrente fornita da una sorgente esterna, in senso inverso a quello in cui circola la corrente da essi fornita, per riportare le lastre nello stato primitivo; di guisa che allora l'accumulatore è atto di nuovo a fornire la corrente. Gli accumulatori in sostanza immagazzinano dell'energia elettrica durante la *carica* e la restituiscono durante la *scarica*.

Il tipo quasi universale di accumulatore si può considerare come un *voltametro ad acqua acidulata con acido solforico, con elettrodi di piombo spugnoso.*

Perchè l'apparecchio risulti pratico viene prima di tutto *formato* con adatti processi che trasformano il piombo delle lastre allo stato spugnoso. Allora sottoponendo l'accumulatore alla carica, le lastre negative, per il fenomeno della elettrolisi già nota, accolgono nei loro pori una notevole quantità di idrogeno e quelle positive una equivalente quantità di ossigeno. Le negative acquistano un aspetto bianco argentino e le positive un color rosso cioccolato per la formazione di biossido di piombo.

Durante la scarica, i ioni si muovono in senso opposto; l'idrogeno portandosi sulla lamina positiva riduce il biossido di piombo in ossido e l'ossigeno che va sulla lamina negativa ossida l'idrogeno trasformandolo in acqua, ossidando anche il piombo trasformandolo in ossido. A questo punto l'accumulatore è scarico e occorre ricaricarlo.

Si chiama *capacità* di un accumulatore il numero di coulomb che può fornire durante la scarica. Ma si conviene di indicare la capacità in *ampèrore*; l'*ampèrora è la quantità di elettricità, misurata in coulomb, fornita dalla corrente di 1 ampère in 1 ora*; vale perciò 3600 coulomb, poichè la corrente di 1 ampère fornisce 1 coulomb al secondo (238). Di guisa che se un certo accumulatore ha la capacità di 50 ampèrore, scaricandolo con la corrente di 1 ampère, la scarica dura 50 ore; scaricandolo con

2 ampère, la scarica dura 25 ore, ecc. In tal modo si sa per quanto tempo si può fare assegnamento sulla corrente di scarica.

Per aumentare la capacità degli accumulatori, gli *elementi* sono formati di due gruppi di lamine disposte parallele e alternate, quelle positive *a a* riunite da una parte ad una verga di piombo *A* e le negative *b b* dall'altra con un'altra verga di piombo *B*; le verghe *A* e *B* costituiscono i poli dell'apparecchio (fig. 385).

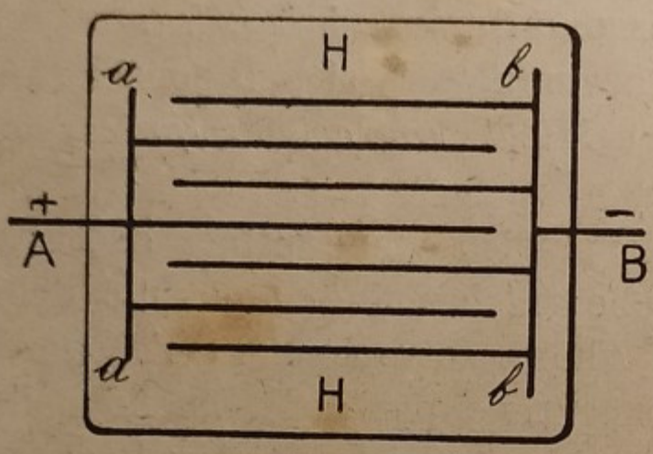


Fig. 385.

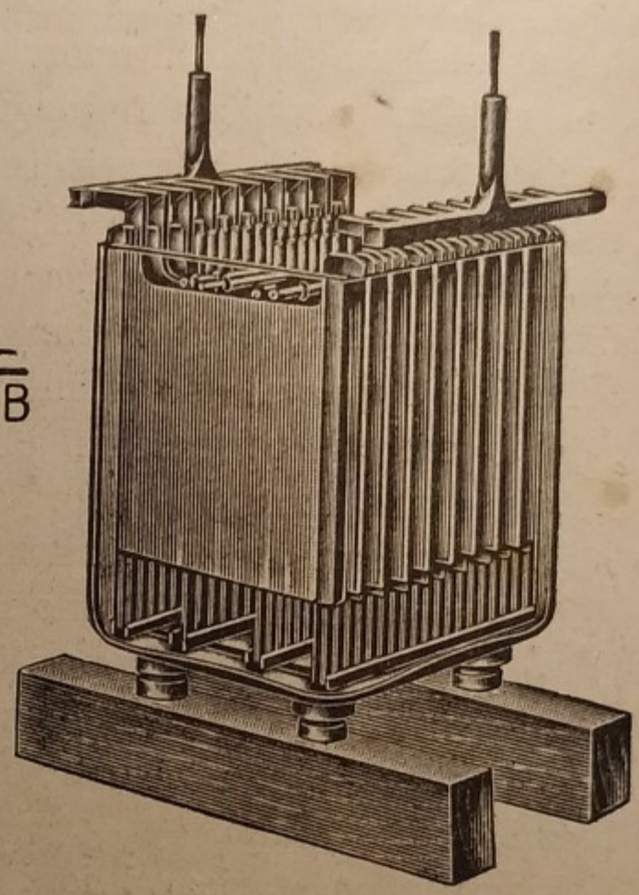


Fig. 386.

Notisi che un elemento di accumulatore è formato da due gruppi di lastre immerse nella stessa massa d'acqua acidulata.

Per impedire un eventuale contatto tra le lastre positive e negative dell'elemento, vi si intromettono delle bacchette di vetro o dei diaframmi forati di celluloide o anche semplicemente delle lamine di legno bucherellate.

La fig. 386 mostra un elemento di accumulatore nel suo insieme.

La batteria è satura quando, come si dice, gli elementi *bollono*, cioè quando si ha un visibile sviluppo di abbondanti bollicine di idrogeno e di ossigeno. Allora si sospende la carica, perchè continuandola non si otterrebbe alcun effetto utile.

Lasciando la batteria a sè, una parte della f. e. m. iniziale che può raggiungere 2,7 volta per elemento, sparisce, di guisa

che durante la scarica si può far conto di 2 volta per ogni elemento, e tal f. e. m. si mantiene quasi costante durante la scarica. Quando l'accumulatore sta per esaurirsi, la f. e. m. scende rapida verso 1,8 volta e allora si deve arrestare la scarica, se non si vuole ottenere una profonda e dannosa alterazione degli elettrodi.

Così è dannoso usare, sia per la carica sia per la scarica, intensità di corrente troppo elevate. I giusti valori sono indicati sempre dai costruttori.

259. Usi degli accumulatori. — Le vetture elettriche e i carri da trasporto elettrici sono azionati da batterie di accumulatori, che vengono ricaricate dopo l'esaurimento.

Comunissima è la illuminazione delle vetture ferroviarie, trainate dalle locomotive a vapore, con lampadine elettriche, alimentate da due piccole batterie di accumulatori, di 6 elementi ciascuna, poste in un'apposita nicchia sotto la vettura.

Nelle centrali elettriche si hanno talora grandi batterie di accumulatori, che vengono caricati dalle dinamo nelle ore di minore richiesta di corrente, e in tal modo sono pronti ad aiutare le dinamo nel caso che queste non bastassero al bisogno nelle ore di massimo consumo, o anche a sostituirle del tutto in caso di guasti riparabili in breve tempo.

A bordo delle automobili si trova sempre una batteria di accumulatori, che viene caricata dalla corrente fornita da una piccola macchina dinamoelettrica messa in moto dallo stesso motore della vettura. La batteria serve per azionare il motorino elettrico per l'*avviamento* della vettura e per alimentare le lampadine.

Leggi della corrente elettrica.

260. Concetto di resistenza elettrica. Unità di resistenza. — L'intensità della corrente data da una pila o da un accumulatore varia secondo la natura, la lunghezza e la sezione del conduttore che ne unisce i poli, e si riscontra che a parità di sostanza del conduttore la corrente s'indebolisce aumentandone

la lunghezza o diminuendone la sezione. Il conduttore compie, si può dire, l'ufficio di un tubo che mette in comunicazione due vasi contenenti lo stesso liquido a diversa altezza, il quale dà passaggio a un flusso di liquido più o meno abbondante secondo la sua forma e le sue dimensioni. E come il liquido a muoversi nel tubo trova una certa resistenza, gli elettroni o i ioni in moto, costituenti la corrente, trovano una resistenza ad attraversare un conduttore.

Stabiliamo alcune *convenzioni* sulla resistenza:

1° Ammettiamo che due conduttori abbiano resistenze *eguali*, se sostituiti l'uno all'altro in un determinato circuito producono *lo stesso indebolimento* della corrente, vale a dire ne lasciano inalterata la intensità.

2° Ammettiamo che due resistenze uguali, unite l'una di seguito all'altra, formino una resistenza *doppia*; che n resistenze eguali consecutive — unite in *serie* — formino una resistenza n volte maggiore. Per conseguenza la resistenza R di più resistenze r_1, r_2, r_3... unite in serie, sarà:

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots$$

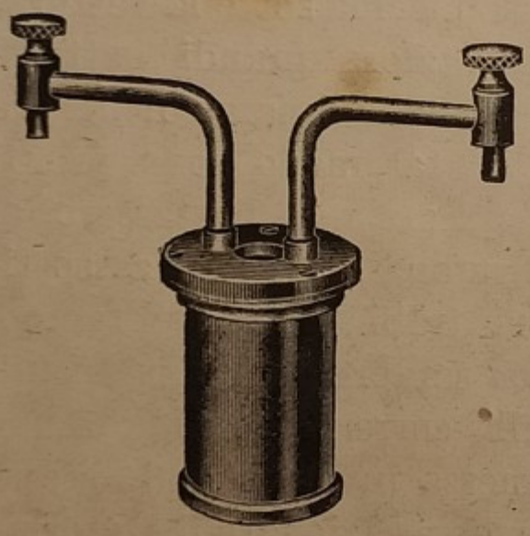


Fig. 387.

L'unità di resistenza, detta *ohm internazionale*, sancita, come l'*ampère*, nel Congresso di Chicago del 1893, *è la resistenza offerta ad una corrente di intensità costante, da una colonna di mercurio, a 0°, di sezione uniforme, della lunghezza di 106,3 centimetri e della massa di 14,4521 grammi.*

Tale colonna ha la sezione approssimativa di 1 mm².

L'ohm campione si trova in molti laboratori preparato in colonna di mercurio, ma più spesso vi si trova in forma di filo di metallo solido — argentana o leghe simili — (fig. 387).

261. Cassette di resistenza. — Si preparano in filo metallico solido delle resistenze di 1, 2, 3, 5, 10..., 100 ohm, e se occorre

anche di 0,1, 0,2... ohm, e si riuniscono in cassette. Ciascuna resistenza R_1, R_2, ... è formata d'un filo di argentana isolato, avvolto, dopo averlo piegato in doppio, sopra un rocchetto di legno. Sul coperchio di ebanite della cassetta sono allineati dei grossi blocchi prismatici *ABC*... (fig. 388) di ottone, di tal forma che fra due consecutivi rimanga una cavità tronco-conica, nella quale si può impegnare una spina tronco-conica di ottone *S* munita di un'impugnatura isolante. Il filo di ciascun rocchetto ha un capo unito ad un blocco e l'altro al successivo; così ciascun blocco, eccettuato il primo e l'ultimo che portano un morsetto *M* per l'unione dei fili del

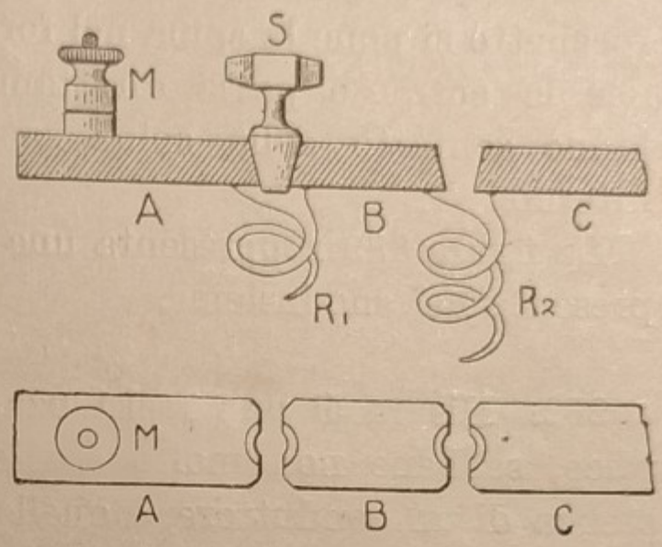


Fig. 388.

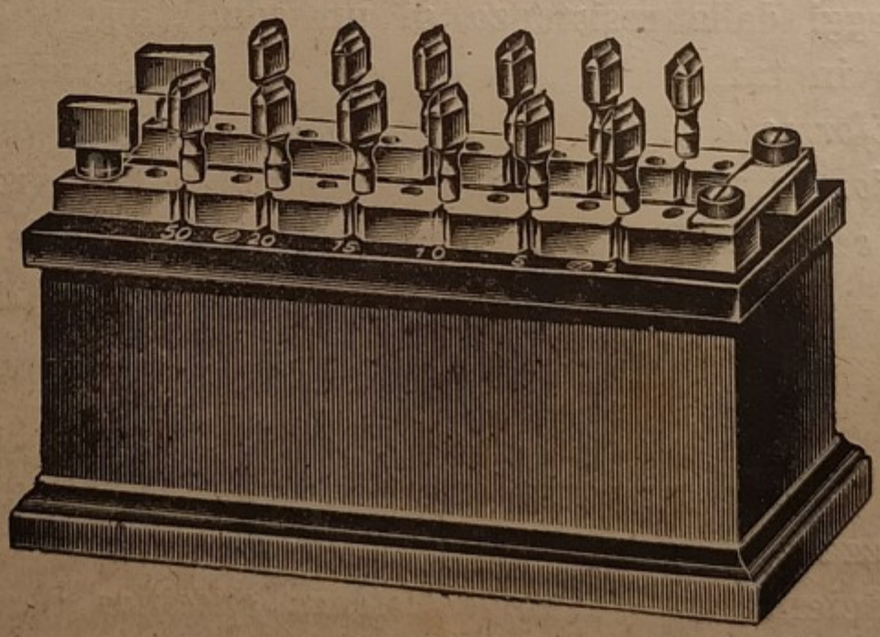


Fig. 389.

circuito, è unito alla estremità del filo di un rocchetto e all'estremità del filo del rocchetto successivo. La cassetta si chiude nel circuito della pila unendo i reofori ai morsetti estremi.

Se le spine son tutte levate, la corrente deve attraversare tutti i rocchetti, e la resistenza introdotta equivale alla resistenza totale della cassetta; e se si vuol sopprimere qualche rocchetto si pone la spina nel foro che vi corrisponde, di guisa che la corrente passa direttamente fra i due blocchi che fanno contatto colla spina senza passare per il rocchetto interno.

La figura 389 rappresenta una cassetta di resistenza come si presenta nel suo insieme.

262. Misura di una resistenza. — Un metodo molto semplice, sebbene non molto esatto, per la misura della resistenza di un conduttore, è quello di inserirlo in un circuito con una pila e un apparecchio misuratore della intensità della corrente. Notata la indicazione dell'apparecchio, si sostituisce la resistenza da misurarsi con una cassetta di resistenza e per tentativi si inseriscono tanti ohm quanti occorrono perchè l'indicazione sia la stessa.

263. Leggi della resistenza di un conduttore filiforme. — Operando in tal modo si trova che *la resistenza di un conduttore filiforme, e in generale di un conduttore a sezione costante, è proporzionale alla sua lunghezza e inversamente proporzionale alla sua sezione.* Potremo perciò esprimere la legge con la formola:

$$r = k\frac{l}{s} \qquad (1)$$

r essendo la resistenza in questione, l ed s rispettivamente la lunghezza e la sezione del conduttore.

Il coefficiente k è detto *resistenza specifica* o anche *resistività* del conduttore; e poichè nella pratica è comodo misurare la lunghezza dei conduttori in metri e la sezione in millimetri quadrati, riteniamo che k misuri la resistenza in ohm di un conduttore lungo 1 metro e della sezione di 1 mm².

Il k varia da sostanza a sostanza e per la stessa sostanza varia qualche po' colla temperatura.

Diamo qui sotto la resistività di alcuni metalli:

Resistività ossia resistenza in ohm per 1 m *di lunghezza e per* 1 mm² *di sezione.*

METALLI PURI			
Alluminio .	0,028	Rame elettrolitico	0,0154
Argento . .	0,015	» commerciale	0,017
Ferro . . .	0,095	Tungsteno alla temperatura ordinaria	0,07
Mercurio .	0,94	» » da 2000° a 2200°	0,80

Le leghe hanno una resistività assai più elevata dei loro componenti; notevole il *nichelcromo* — lega di nichel e cromo — la cui resistività è circa uno. Un filo di nichelcromo di 1 m. di lunghezza ha perciò una resistenza eguale a quella di un filo di rame della stessa sezione lungo 65 metri.

Da quanto precede apparisce che il rame puro, dopo l'argento, che non viene usato per il suo elevato prezzo, è il metallo che presenta la minima resistività ossia la massima conduttività; perciò il rame è quasi universalmente usato nelle condutture che servono a trasportar la corrente e negli avvolgimenti degli apparecchi elettrici.

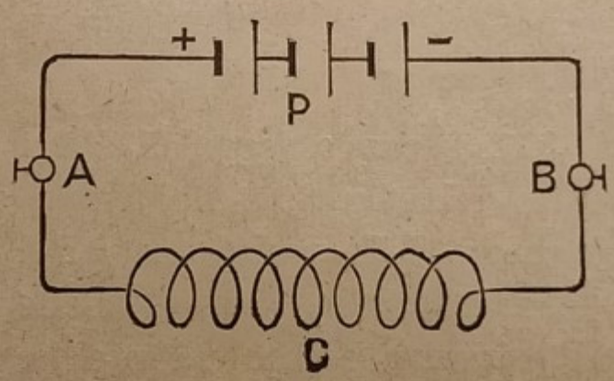


Fig. 390.

264. Prima legge di Ohm. — Ai poli di una pila P sono fissati due morsetti AB, fra i quali si può inserire un filo metallico C che si può cambiare a volontà (fig. 390). Misurando l'intensità i della corrente che attraversa questo conduttore, la d. d. p. $V_A - V_B$ presentata dai punti AB e la resistenza r del conduttore C si riscontra sempre la relazione:

$$i = c\,\frac{V_A - V_B}{r}, \qquad (1)$$

la quale dichiara la *1ª legge di Ohm: l'intensità della corrente che attraversa un conduttore metallico è proporzionale alla d. d. p. attiva ai suoi estremi ed inversamente proporzionale alla sua resistenza.*

Il c è un coefficiente di proporzionalità, ma giova subito dire che le unità di misura di intensità, di d.d.p. e di resistenza sono state scelte in modo che esso sia eguale ad uno, e precisamente l'unità di resistenza, l'ohm, definita nel § 260, è tale che un conduttore, come quello C della precedente figura, *ha la resistenza di 1 ohm se stabilendo ai suoi capi AB una d. d. p. di 1 volta la corrente che lo attraversa ha la intensità di 1 ampère.* In seguito a tale convenzione la formula (1) diventa:

$$i = \frac{V_A - V_B}{r}. \qquad (2)$$

Ad esempio, se il filamento di una certa lampada ad incandescenza ha la resistenza di 625 ohm, e la d. d. p. ai punti di attacco è 125 volta, l'intensità i della corrente che la attraversa è:

$$i = \frac{125}{625} = 0{,}2 \text{ ampère.}$$

265. Seconda legge di Ohm. — Riferiamoci ancora al circuito della fig. 390, nel quale supponiamo di conoscere, oltre il valore della resistenza r del conduttore C che unisce i poli — *resistenza esterna* —, anche la resistenza r_1 dell'altra parte del circuito comprendente la pila — *resistenza interna* — e la forza elettromotrice e della pila, che, com'è stato detto (243), è la d. d. p. che si avrebbe ai morsetti A e B se fosse tolto il conduttore C. Un ragionamento matematico, che non può qui essere esposto, dimostra che fra le citate grandezze esiste la seguente relazione:

$$i = \frac{e}{r + r_1}$$

essendo i l'intensità della corrente che passa nel circuito. Questa formola dichiara la 2ª legge di Ohm: *in un circuito*

chiuso attraversato da corrente, l'intensità è eguale al rapporto fra la forza elettromotrice attiva e la somma delle resistenze esterna ed interna del circuito, ossia la *resistenza totale*. S'intende che le grandezze i, e, r e r_1 vanno misurate rispettivamente in ampère, in volta e in ohm.

Ad esempio, formando un circuito con un elemento Leclanché, avente f. e. m. di 1,4 volta e resistenza interna di 10 ohm chiuso sopra un filo della resistenza di 20 ohm, si otterrà una corrente di:

$$i = \frac{1,4}{20 + 10} = 0,047 \text{ ampère.}$$

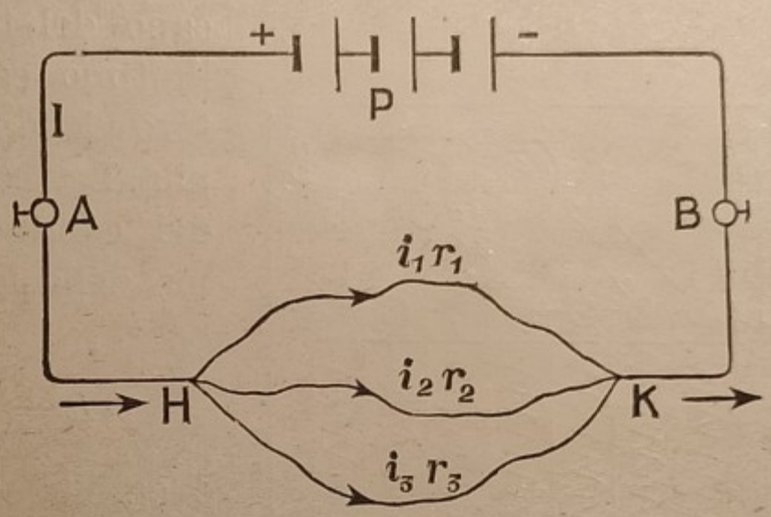


Fig. 391.

266. Circuiti derivati. — Un circuito elettrico è raramente semplice come quello della fig. 390; spesso il circuito alimentato dalla sorgente di elettricità, per esempio, da una pila P, è formato di più conduttori, come è indicato dalla fig. 391, aventi i capi a comune in H e K. I conduttori sono così uniti *in derivazione* o *in parallelo* e vengono detti conduttori *derivati*.

Le loro resistenze singole siano r_1, r_2, r_3; avviene che la corrente I della pila che arriva al punto H si suddivide in tre *correnti derivate* i_1 i_2 i_3. Una legge fondamentale sempre verificata dall'esperienza è che:

$$I = i_1 + i_2 + i_3 , \qquad (1)$$

perciò le tre correnti arrivate al punto K ricostituiranno la stessa corrente I nell'unico conduttore che segue.

Or indicando per brevità col simbolo Δ la d. d. p. nei punti H e K, per la 1ª legge di Ohm, si ha:

$$i_1 = \frac{\Delta}{r_1} ; \qquad i_2 = \frac{\Delta}{r_2} ; \qquad i_3 = \frac{\Delta}{r_3} . \qquad (2)$$

Vale a dire *le intensità delle correnti derivate sono inversamente proporzionali alle resistenze dei rispettivi rami derivati.*

267. Conduttori in serie. — Più conduttori si dicono riuniti *in serie* se un capo del primo essendo unito a uno dei poli della pila, l'altro capo è unito a uno dei capi del secondo conduttore, l'altro capo di questo a un capo del terzo e così via, sì che l'ultimo capo dell'ultimo conduttore viene unito all'altro polo della pila. La resistenza R del complesso dei conduttori è eguale alla somma delle loro resistenze singole r_1, r_2, r_3 ...,

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots,$$

e ognuno è percorso dalla stessa corrente, cioè dalla corrente principale.

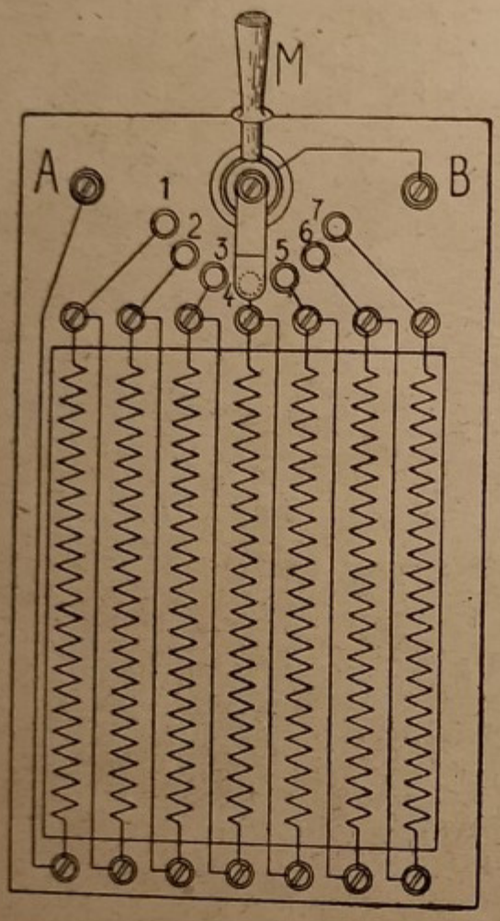


Fig. 392.

268. Reostati. — Sono apparecchi che servono per introdurre in un circuito delle resistenze variabili allo scopo di regolare l'intensità della corrente assorbita da un qualunque apparecchio di utilizzazione — lampade, bagni elettrolitici, motori, ecc. — Sono formati di diverse spirali di filo di argentana o di manganina, unite in serie e divise in sezioni, che vengono congiunte con dei bottoni metallici 1, 2, 3... 7, come è indicato nella fig. 392. Una manovella metallica M può a volontà far contatto coll'uno o coll'altro dei bottoni anzidetti; A e B sono i morsetti del reostato.

Per cambiare la resistenza inserita nel circuito basta inserire un diverso numero di spirali, ciò che si ottiene spostando la manovella e mettendola a contatto con l'uno o coll'altro dei bottoni citati.

Tali apparecchi si dicono reostati a resistenza *variabile*, per distinguerli dai reostati a resistenza *fissa*, che non hanno, crediamo, bisogno di essere illustrati.

Diremo infine che nella costruzione dei reostati, coi quali si vuole semplicemente raggiungere certi valori di resistenza, per economia di spazio e di spesa, si ricorre a fili di alta resistività, come l'argentana, la manganina e simili.

Effetto termico della corrente.

269. Legge di Joule. — La corrente elettrica sviluppa sempre del calore in un filo che attraversa (*effetto Joule*); un corto filo metallico che unisce i poli di un accumulatore si riscalda subito e se è sottile si arroventa e può facilmente fondere. Questo fenomeno in cui l'energia elettrica si trasforma in calore è analogo al riscaldamento ottenuto strofinando fra loro due corpi, dove si ha una trasformazione in calore dell'energia meccanica consumata a vincere l'attrito tra i corpi stessi; nel fenomeno elettrico si trasforma in calore l'energia elettrica necessaria a vincere la resistenza che il filo offre al movimento degli elettroni nel quale consiste la corrente.

Il Joule ha trovato sperimentalmente la seguente legge:

la quantità di calore generata da una corrente in un conduttore è proporzionale al quadrato dell'intensità della corrente, alla resistenza del conduttore e al tempo.

Questa legge si può esprimere con la formula:

$$Q = 0{,}24\, I^2 rt,$$

dove la quantità di calore Q è misurata in piccole calorie, I in ampère r in ohm, e t in secondi. L'esperienza dimostra inoltre che la quantità di calore è indipendente dal senso della corrente.

270. Lampade elettriche a incandescenza. — Si può dire che tutte le applicazioni degli effetti termici della corrente sono fondate sulla *localizzazione* del calore in una porzione del circuito.

Una *lampada elettrica a incandescenza* è costituita di un'ampolla di vetro in cui è fatto il vuoto, contenente un sottil filo conduttore portato all'incandescenza per renderlo luminoso.

Le prime lampade a incandescenza erano a filamento di carbone. L'Edison, che ne fu l'inventore, usava dei filamenti ottenuti carbonizzando delle fibre di bambou; poi si costruirono i filamenti con carbone amorfo e a prepararli per primo fu il torinese Cruto, ora ingiustamente quasi dimenticato; infine vennero in uso i filamenti metallici.

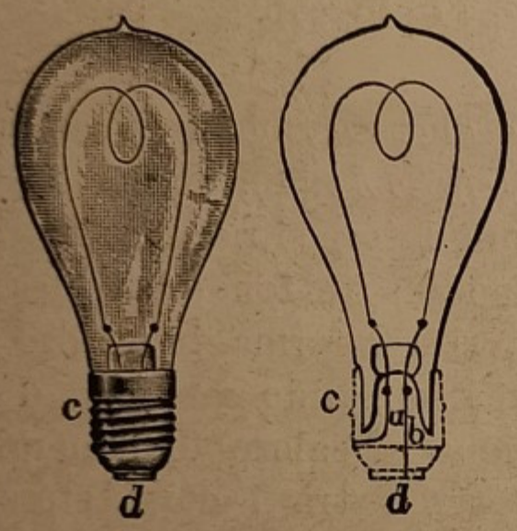


Fig. 393.

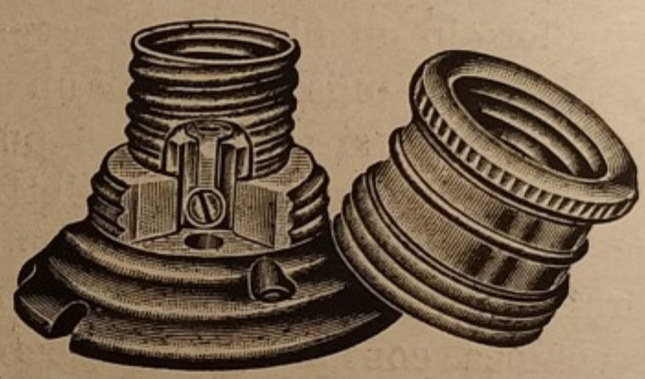


Fig. 394.

In tutti i modi il filamento, piegato a ferro di cavallo o girato su se stesso, viene coi capi saldato a due fili metallici saldati nel vetro e che escono all'esterno saldati ai fili di rame *a b* (fig. 393) destinati a portare la corrente. Questi fili sono riuniti l'uno ad una ghiera d'ottone filettata *c*, l'altro ad un bottone *d* che sporge sul fondo della lampada. La ghiera e il bottone sono fissi all'ampolla ed isolati l'un dall'altro mediante della pasta di gesso.

La lampada viene avvitata nel portalampade (fig. 394), con che i capi del filamento riescono senz'altro a contatto coi fili di linea.

Il vuoto dell'ampolla è necessario per evitare la combustione del carbone.

Tali lampade però presentavano dei gravi inconvenienti; principale, l'elevato consumo d'energia. Oltre a ciò la luce data da tali lampade era bianco-rossastra per il fatto che la tempe-

ratura del filamento non poteva essere spinta troppo senza che ne avvenisse una rapida disgregazione.

Dopo molti tentativi, i tecnici si sono ora fermati all'uso quasi esclusivo dei filamenti di tungsteno. Questo metallo che fonde verso i 3000° e che allo stato di incandescenza possiede una resistività assai elevata (263), si presta assai bene allo scopo. Infatti esso può sopportare una temperatura di 2500°

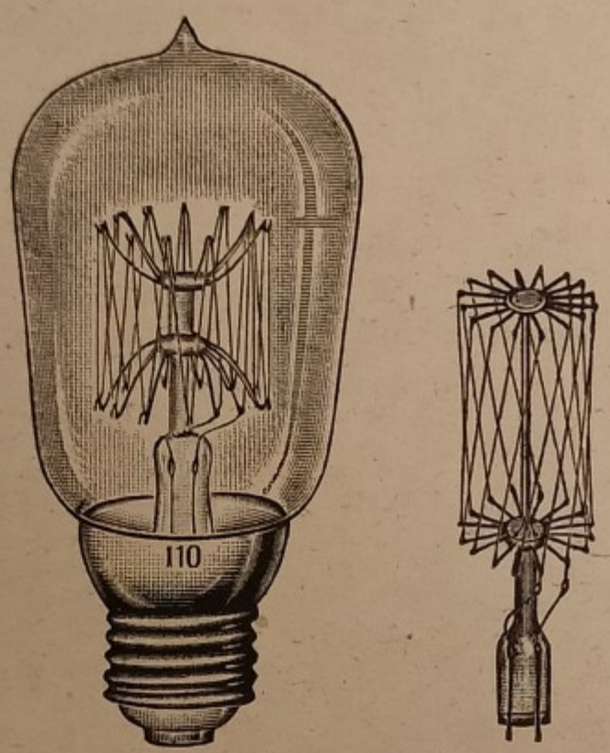


Fig. 395.

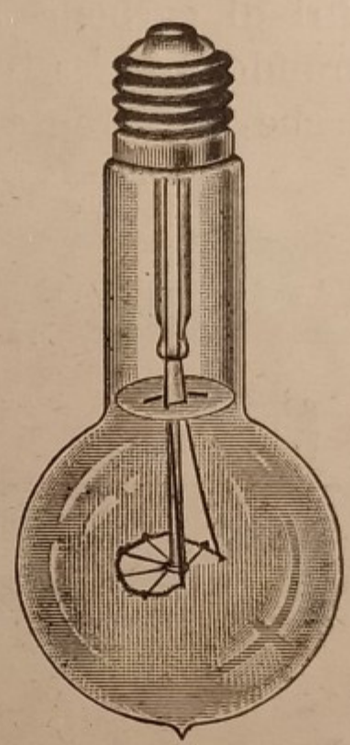


Fig. 396.

senza disgregarsi in modo notevole, e a tal temperatura emette una luce bianchissima, consumando relativamente una quantità limitata di energia.

Il filamento di tungsteno, però, che si trova nelle comuni lampadine, in causa della sua minore resistività rispetto a quello di carbone, è assai lungo e sottile e non ha quindi, specialmente perchè a caldo si rammollisce, rigidità sufficiente per sostenersi da sè come i filamenti di carbone delle vecchie lampade. Perciò esso è piegato a zig-zag e sostenuto da uno speciale supporto, come apparisce nella figura 395, o avvolto a spirale di piccolo diametro sostenuta da adatti bracciuoli (fig. 396).

A parità di temperatura un filo spiralizzato irradia meno calore di un filo identico teso in linea retta, cosicchè la stessa corrente porta il filo spiralizzato a una temperatura di regime superiore, con un rendimento quindi più elevato.

271. Lampade elettriche ad arco. — L'*arco voltaico* fu ottenuto la prima volta dal Davy nelle seguenti condizioni. Egli unì i due poli di una potente pila a due cilindri di carbone di legno in contatto. Separando progressivamente i carboni, egli notò che la corrente continuava a passare

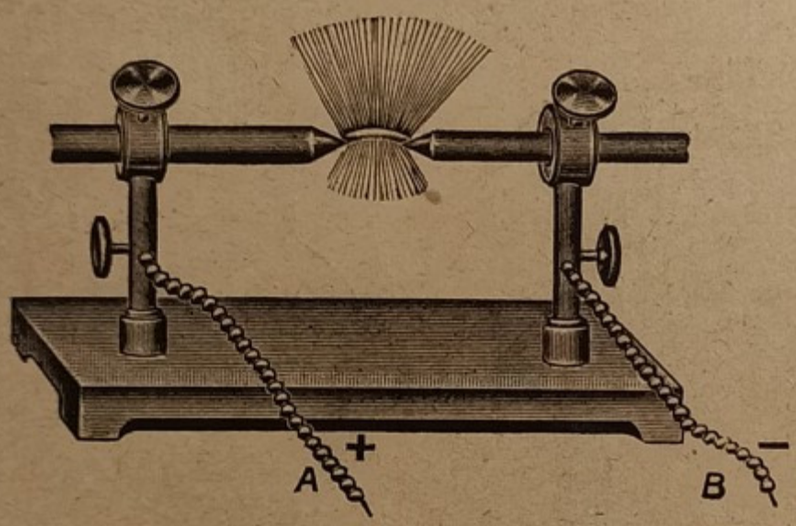


Fig. 397.

Fig. 398.

tra le punte arroventate dei carboni e la massa interposta di gas incandescente che proveniva dalla disgregazione dei carboni stessi.

Il carbone di legno consumandosi rapidamente, fu sostituito da cilindri ritagliati dal carbone di storta, e più tardi da cilindri fatti artificialmente con speciali impasti.

Disponendo i due carboni orizzontali quando la lampada funziona, si scorge fra i due carboni una fiamma ad arco col vertice in alto, soffiata in su dalla corrente d'aria calda ascensionale; d'onde appunto venne il nome di lampada ad arco (fig. 397).

Di solito i carboni vengono disposti allineati verticali, il positivo in alto. Questo, dopo poco tempo che la lampada funziona, si incava a *cratere*, mentre il carbone negativo presenta l'estremità arrotondata (fig. 398).

Nella lampada ad arco il vero focolare luminoso è il cratere positivo, che raggiunge una temperatura di 4000°.

La fig. 399 rappresenta una lampada ad arco con un regolatore a mano per avvicinare i carboni man mano che si consumano.

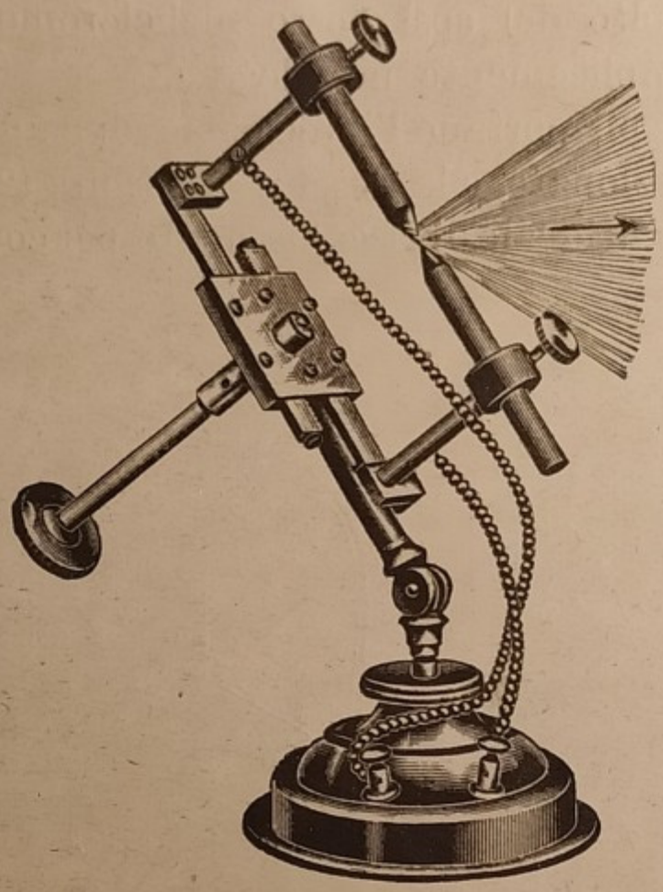


Fig. 399.

Le lampade ad arco, esclusivamente e limitatamente adoperate per l'illuminazione fino al 1878, in cui l'Edison fece conoscere la prima lampada a incandescenza, oggi si usano solo nei proiettori cinematografici e nei proiettori militari e navali.

Fig. 400.

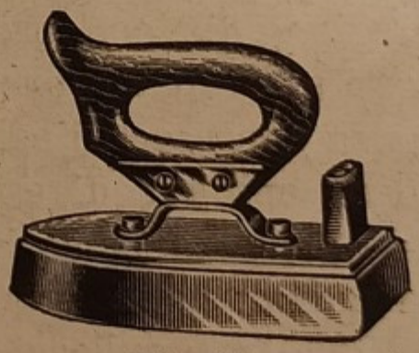


Fig. 401.

272. Altre applicazioni dell'effetto Joule. — Fornelli da cucina (fig. 400), ferri da stiro (fig. 401), stufe elettriche (fig. 402) ed altri apparecchi consimili utilizzano oggi il calore sviluppato

dalla corrente. Tali apparecchi nel tipo più comune portano nell'interno un filo di alta resistività, che può sopportare una temperatura sufficientemente elevata.

È molto usato il *nichelcromo* o *nicromo*, lega di nichel e cromo, ma molto del così detto nichelcromo che viene oggi venduto è semplicemente una lega di ferro e cromo.

Tali apparecchi portano l'indicazione della d. d. p. in volta a cui devono funzionare, e la potenza assorbita (281); essi rappresentano il sistema ideale di riscaldamento per comodità e pulizia.

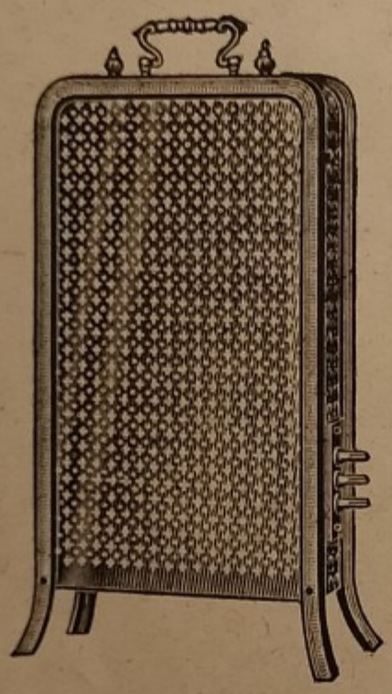


Fig. 402.

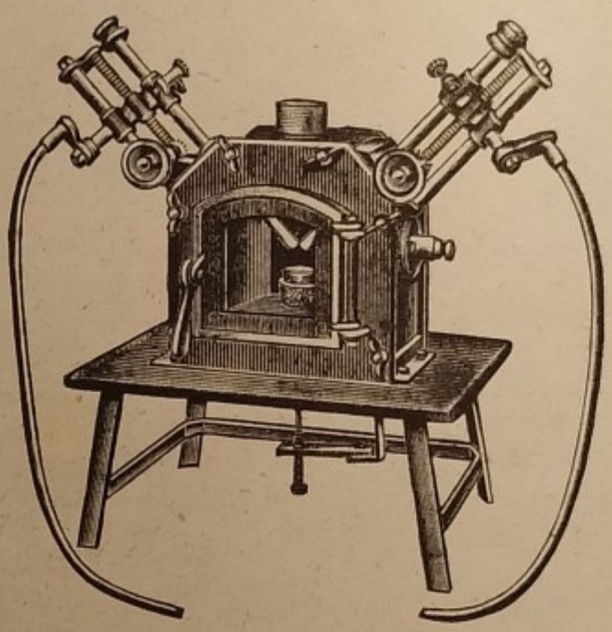


Fig. 403.

Nei *forni elettrici*, di cui la figura 403 mostra un modello da laboratorio, si possono ottenere temperature elevatissime, non raggiungibili con processi di combustione. Essi possono oggi sostituire gli *altiforni* per la riduzione dei minerali di ferro, senza consumo di carbon fossile, fatto che per l'Italia, che ha scarse miniere di carbone ed estese possibilità di sfruttare il così detto *carbone bianco*, cioè le cadute d'acqua per ottenere la corrente, ha grandissima importanza economica.

Un'altra applicazione dell'effetto Joule si ha negli amperimetri e voltmetri (280) *termici*, nei quali la corrente che si vuol misurare passa in un filo che si riscalda e per conseguenza si allunga. L'allungamento, con opportuno sistema di trasmissione, produce il movimento dell'indice sul quadrante graduato.

E diciamo infine due parole sui *fili fusibili.*

Se in un impianto elettrico la corrente, per una qualsiasi ragione, supera un certo limite, si produce un forte riscaldamento nei fili, che può danneggiare gli apparecchi ed essere anche causa d'incendio. Il fatto è particolarmente grave quando si forma un *corto circuito*; cioè quando vengono a contatto due fili a potenziale diverso.

In tal caso, infatti, dato il piccolo valore assunto dalla resistenza, si ha un passaggio di una forte intensità di corrente con conseguente forte riscaldamento dei fili. Per evitare tale pericolo i conduttori sono muniti di *valvole* destinate a interrompere la corrente non appena questa supera un certo limite. Le più semplici valvole sono i fili fusibili, che sono dei corti fili di piombo o di lega d'argento attraversati dalla corrente e che fondendo non appena la corrente arriva a un certo limite, interrompono il circuito, evitando ogni pericolo.

Correnti termoelettriche.

La 3ª legge di Volta (241) dichiara che in una catena chiusa formata di soli metalli tutti *alla stessa temperatura* non si ha alcun movimento di elettricità, cioè alcuna corrente. Una corrente però può generarsi se in qualche punto della catena si determina una variazione di temperatura. La corrente che si desta vien detta *termoelettrica*, e la corrente viene prodotta col consumo di una corrispondente quantità di calore.

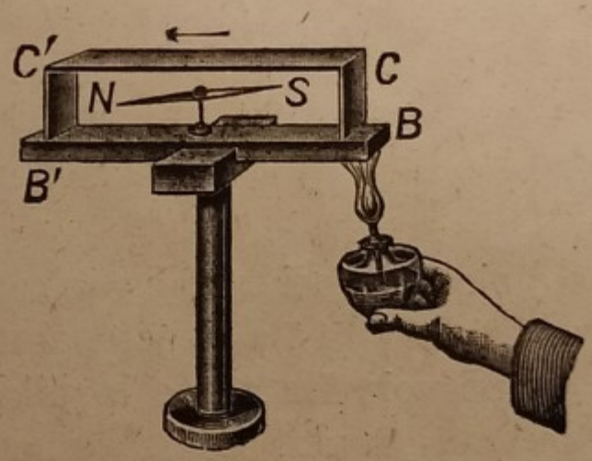


Fig. 404.

273. Coppia termoelettrica di Seebeck. — È in sostanza una catena chiusa formata di una sbarra di bismuto *BB'* (fig. 404) saldata cogli estremi ad una sbarra di antimonio *CC'* sì da formare un rettangolo che viene messo nel meridiano magnetico (215). Un ago di declinazione posto nel suo interno rimane così nel piano del rettangolo. Se ora si scalda una delle salda-

ture, per esempio la *B*, si genera nel circuito formato dai lati del rettangolo una corrente rivelata da una deviazione subìta dall'ago. Come una corrente elettrica agisca sopra un ago magnetico verrà poco più innanzi spiegato (275), dove verrà anche spiegato come dal senso della deviazione dell'ago si possa stabilire il senso della corrente. Nel caso da noi contemplato la corrente termoelettrica va dal *bismuto all'antimonio attraverso la saldatura riscaldata.*

Il fenomeno è generale, cioè avviene usando due metalli eterogenei qualunque; ma in tutti i casi la forza elettromotrice *termoelettrica*, intesa precisamente come quella di una comune pila, è assai piccola. Essa per la differenza di temperatura di 1° fra le due saldature è di pochi microvolta — milionesimi di volta —; la più grande si verifica per la coppia bismuto-antimonio, dove arriva a circa 120 microvolta.

274. Pile termoelettriche. — Per conseguenza, se si vogliono ottenere d. d. p. di discreto valore, bisogna unire più

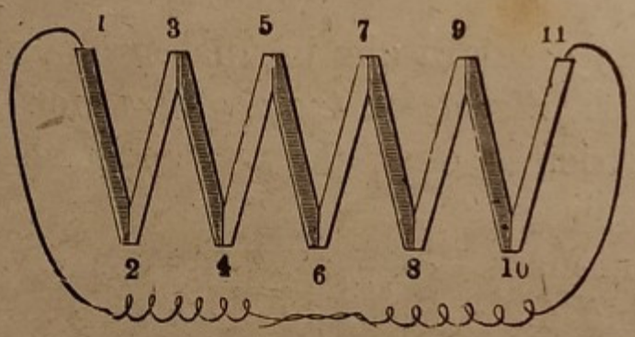


Fig. 405.

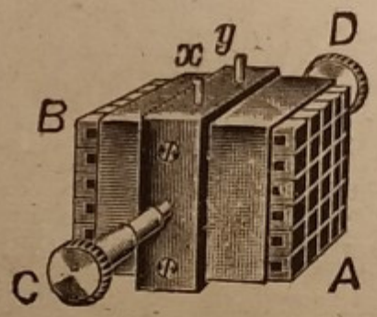


Fig. 406.

coppie termoelettriche in serie, come si è fatto per le coppie voltaiche (244); si ottengono così le *pile termoelettriche.*

Notevole fra tutte la pila termoelettrica del fisico M. Melloni di Parma. Essa, come apparisce dalla figura schematica (fig. 405), è formata di una catena di sbarrette di bismuto e antimonio saldate di seguito, disposte in modo che le saldature di ordine dispari 1, 3, 5... sieno da una stessa parte, e quelle pari, 2, 4, 6... dall'altra.

Foggiando poi le sbarrette a **Z** se ne potrà comprendere molte in piccolo volume, com'è indicato nella figura 406, che rappresenta la pila termoelettrica del Melloni in grandezza quasi

naturale. In essa sulle faccie A e B vengono a trovarsi rispettivamente le saldature dispari e pari: le estremità della prima e dell'ultima sbarretta sono unite ai morsetti C e D, che servono a unire la pila con un apparecchio di misura della corrente. Con tale disposizione è facile provocare una differenza di temperatura fra le due faccie della pila, da che risulta una f. e. m. eguale alla somma delle f. e. m. di ciascuna coppia, presso a poco proporzionale alla differenza di temperatura fra le due faccie e per conseguenza una corrente d'intensità sufficiente per essere rilevata e anche misurata.

Questi apparecchi però, non hanno applicazioni come produttori di corrente, i tentativi fatti a tale scopo non avendo dato finora soddisfacenti risultati; sono stati adoperati per misurare la differenza di temperatura fra le due faccie. In certi modelli la sensibilità è sufficiente per poter accertare differenze di temperatura inferiori a un millesimo di centigrado. Il citato Melloni potè compiere colla sua pila termoelettrica dei lavori meravigliosi sul calore raggiante. Oggi però la scienza dispone di altri apparecchi enormemente più sensibili.

Una delle principali applicazioni del fenomeno termoelettrico si ha nei *pirometri elettrici*, che servono alla misura di temperature fino a 1500°. Il *pirometro Le Chatelier* è formato di una coppia termoelettrica platino-platinorodiato — al 10% di rodio —, una saldatura della quale è messa nel forno, mentre l'altra all'esterno si trova alla temperatura dell'ambiente.

La temperatura è desunta dall'indicazione dell'apparecchio di misura della intensità della corrente, che viene preventivamente tarato immergendo la saldatura del pirometro in bagni aventi temperature note.

Elettromagnetismo.

In questo capitolo vengono esposti i fenomeni dovuti alle azioni magnetiche d'una corrente elettrica. Il punto di partenza di questi fatti è cronologicamente l'esperienza di Oersted.

275. Campo magnetico di una corrente rettilinea. — Un filo percorso da una corrente produce un campo magnetico. La prima prova del fenomeno data dal fisico danese Oersted nel 1820, si può ottenere con la seguente esperienza. Sopra un ago magnetico di declinazione (215) che com'è noto si dispone da nord a sud, si pone un filo di rame AB parallelo all'ago. Lanciando la corrente nel filo di rame, l'ago devia e sotto l'azione combinata della Terra e della corrente, prende un'altra posizione di riposo. Cambiando il senso della corrente, cambia il senso della deviazione dell'ago (fig. 407).

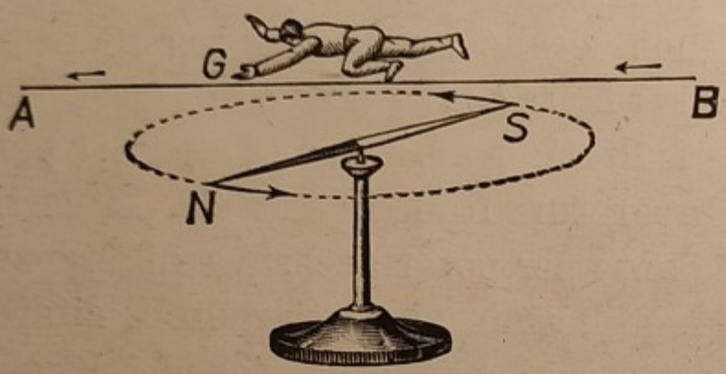


Fig. 407.

Per precisare con una facile regola mnemonica il senso della deviazione, Ampère propose la *regola* che porta il suo nome: *il polo nord dell'ago si porta alla sinistra della corrente personificata*, ossia alla sinistra di un piccolo osservatore che adagiato lungo il filo, coi piedi dalla parte del polo positivo della pila, volga all'ago la faccia.

Tale regola può anche sostituirsi coll'altra regola equivalente detta *regola della mano destra*:

sopra uno qualunque dei tratti del filo che porta la corrente si distende la mano destra in modo che la corrente entri dal polso ed esca per le dita, e il palmo sia rivolto verso l'ago; il polo nord dell'ago si volge dalla parte del pollice.

La deviazione subìta dall'ago è tanto maggiore quanto maggiore è l'intensità della corrente e più piccola la distanza dell'ago dal conduttore, di modo che con una corrente assai intensa l'ago tende a disporsi in croce col filo.

La ragione del fatto scoperto da Oersted la troviamo nell'esame del campo magnetico prodotto da un filo rettilineo attraversato da una corrente. Si prenda un filo di rame teso verticalmente che attraversi un cartoncino orizzontale e facciamo passare nel filo una corrente alquanto intensa, da 10

a 15 ampère. Spargendo sul cartoncino della limatura di ferro e picchiandovi sopra, come abbiamo già fatto per ottenere gli spettri delle calamite, osserveremo che le linee di forza sono circolari, aventi per asse il conduttore (fig. 408). Lo spettro rimane inalterato spostando il cartone in altezza.

Se poi, sul cartoncino si pone qualche piccolo ago di declinazione, si vedrà che esso si dispone sensibilmente ortogonale al filo. Invertendo la corrente, l'ago esploratore fa mezzo giro su se stesso disponendosi in senso contrario.

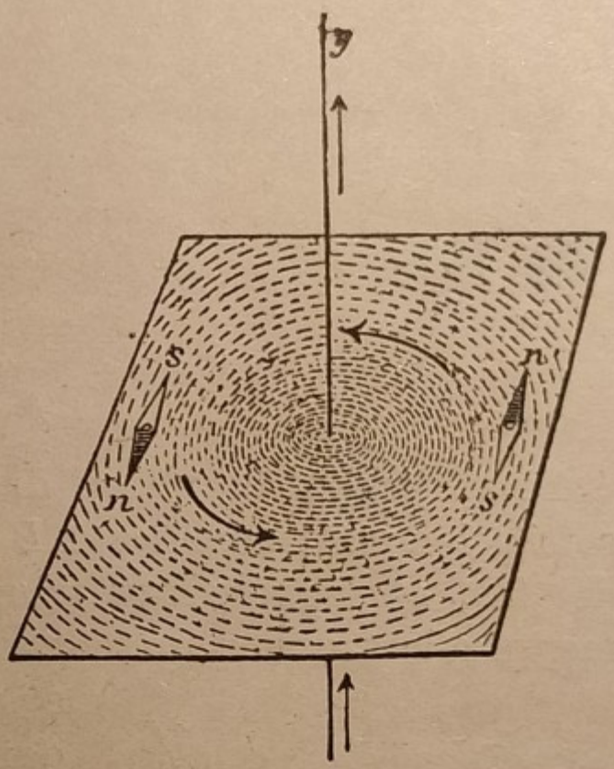


Fig. 408.

Dall'orientazione dell'ago è facile dunque segnare il senso delle linee di forza (209), ciò che si può anche ottenere servendosi della regola della mano destra. Basta poggiare la mano destra lungo il conduttore, sì che la corrente entri dal polso ed esca dalle dita col palmo rivolto verso il punto di sospensione dell'ago, il *polo nord dell'ago si troverà rivolto dalla parte del pollice.* Questo fatto non è che la ripetizione pura e semplice del fenomeno scoperto da Oersted.

L'intensità in un dato punto A del campo prodotto da una corrente rettilinea è direttamente proporzionale all'intensità della corrente che attraversa il filo e inversamente proporzionale alla distanza del punto considerato dal filo stesso.

È questa la nota *regola di Biot e Savart.*

276. Campo magnetico di una corrente circolare. — Col solito sistema si produce lo spettro magnetico sopra un cartoncino o una tavoletta disposta orizzontalmente attraversata da un conduttore piegato a cerchio, avente l'asse sulla tavoletta

stessa (fig. 409). Le linee di forza sono in questo caso, una l'asse e le altre sono linee simmetricamente disposte da una parte e dall'altra dell'asse, via via sempre più curve in vicinanza dei punti della tavoletta attraversati dal conduttore e quelle vicine ai punti stessi vi si chiudono attorno. Le linee tagliano normalmente il piano della corrente e il senso del campo è precisato sempre colla regola della mano destra. La forma del conduttore non ha influenza.

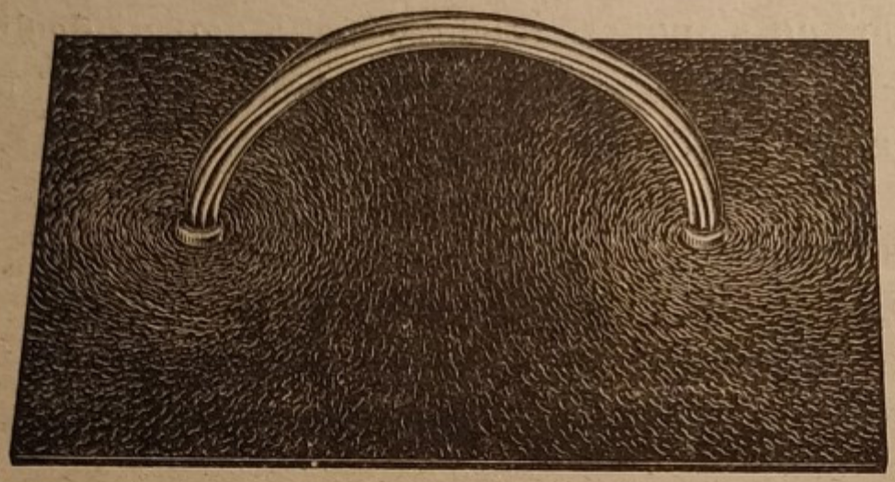


Fig. 409.

Lo spettro ha i caratteri di quello che si otterrebbe con una sottile lamina magnetica *AB* (fig. 410), limitata dal contorno del filo, e magnetizzata trasversalmente, cioè perpendicolarmente alle faccie e presentante su una di queste il polo nord e sull'altra il polo sud. Si può quindi ritenere che una corrente circolare sia equivalente a una lamina magnetica terminata al suo contorno. La faccia nord della corrente si può individuare con la regola della mano destra, in base alla quale risulta anche che un osservatore, posto di fronte alla spira, ha davanti a sè la faccia nord se vede la corrente nella spira circolare in senso inverso alle lancette dell'orologio (fig. 411).

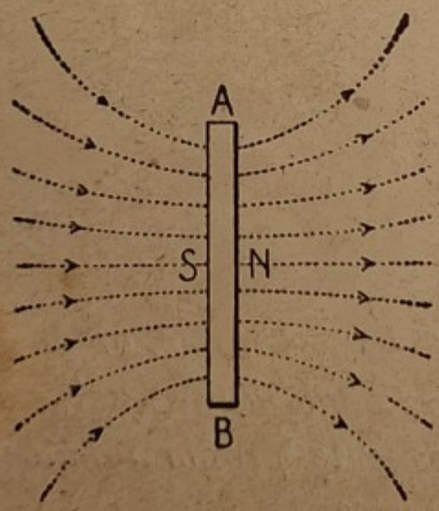


Fig. 410.

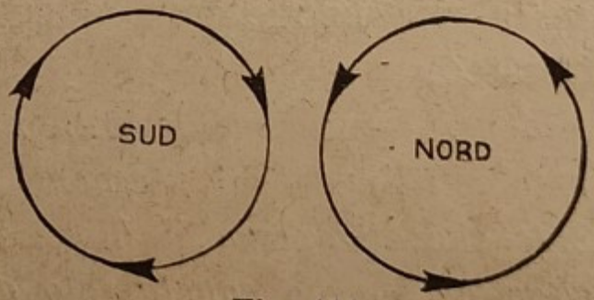


Fig. 411.

Per ottenere nell'ultima esperienza uno spettro ben visibile, occorrerebbe una corrente di alcune decine di ampère, che ordinariamente non è disponibile nelle scuole. Si ripara usando anzichè un filo che fa un solo giro, un filo che fa, ad esempio, 20 giri; e in tal caso, usando una corrente, poniamo, di 5 ampère, si ottiene lo stesso effetto che si otterrebbe con un semplice giro percorso da $5 \times 20 = 100$ ampère.

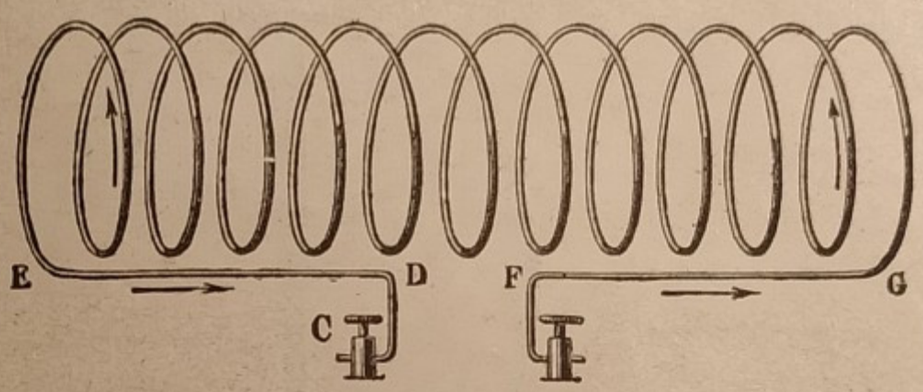


Fig. 412.

277. Campo magnetico di un solenoide. — Un *solenoide* è un sistema di correnti circolari eguali, della stessa intensità e senso, poste vicine, equidistanti, aventi lo stesso asse. Si realizza praticamente un solenoide avvolgendo ad elica un filo conduttore (fig. 412).

Il campo magnetico dentro un solenoide si esplora facilmente, disponendo nell'interno un cartoncino orizzontale comprendente l'asse del solenoide. La limatura si dispone su rette parallele all'asse per quasi tutto lo spazio interno, solo verso le estremità le linee s'incurvano divergendo e accennando di congiungersi all'esterno, quelle uscenti da un'estremità con quelle entranti dall'altra (fig. 413).

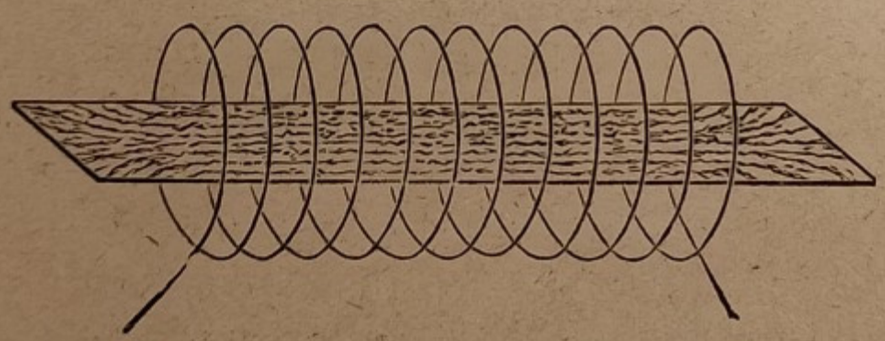


Fig. 413.

Lo spettro di un solenoide ha i caratteri di quello di una calamita rettilinea (211); perciò un solenoide è assimilabile ad una calamita, coi poli posti alle estremità.

Il senso del campo magnetico è poi precisato anche in questo caso colla regola della mano destra.

Nella Elettrotecnica si dimostra che per un solenoide rettilineo di lunghezza piuttosto grande rispetto al diametro, il campo nei punti interni ha un'intensità H (208) data dalla formola:

$$H = 1{,}25 \frac{Ni}{l} \text{ gauss}; \qquad (1)$$

essendo N il numero delle spire, i la intensità della corrente

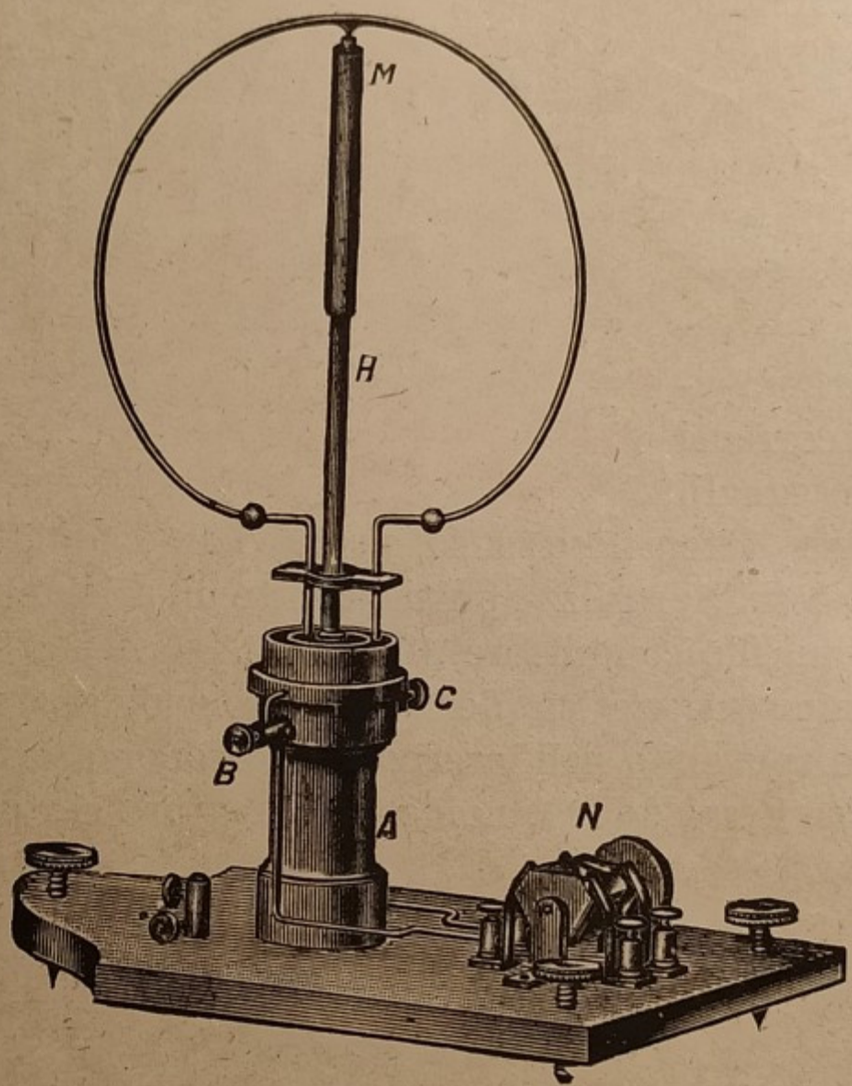


Fig. 414.

misurata in ampère, ed l la lunghezza del solenoide misurata in centimetri.

Che una spira percorsa da una corrente equivalga a una lamina magnetica terminata al suo contorno, lo si può provare coll'apparecchio della figura 414.

Un supporto di sostanza isolante A porta in alto due pozzetti anulari e coassiali pieni di mercurio. Le due masse di mercurio comunicano coi morsetti B e C che prendono la corrente che viene da una pila. Si prepara una spira metallica

con le estremità piegate parallelamente che si fanno pescare rispettivamente nei due pozzetti di mercurio, mentre una punta di acciaio, fissata alla spira in alto, poggia contro il fondo di un piccolo ditale di vetro *M*. Questo ditale è fissato sopra una colonnina verticale *H* diretta secondo l'asse dei due pozzetti e formata di due parti scorrevoli l'una dentro l'altra, in modo che usando, oltre la spira, altre forme di conduttori, gli estremi di questi si possono sempre disporre a giusto contatto col mercurio. Con questo dispositivo il conduttore è libero di muoversi intorno a un asse verticale con lievissimo attrito. Quando la spira è attraversata dalla corrente la si vedrà *orientarsi* presentando la sua faccia a nord verso il polo nord della Terra.

Se si avvicina all'una o all'altra faccia un polo di una calamita, si riscontra un'attrazione o una ripulsione, secondo che la faccia della spira è un polo di segno contrario od eguale a quello della calamita. Se si inverte il senso della corrente nella spira facendo uso di un commutatore *N*, la polarità delle faccie della spira risulta anche invertita e le azioni del polo magnetico sulla spira s'invertono anche.

278. Elettrocalamite. — Sappiamo che un corpo ferromagnetico posto in un campo magnetico si magnetizza (210) e

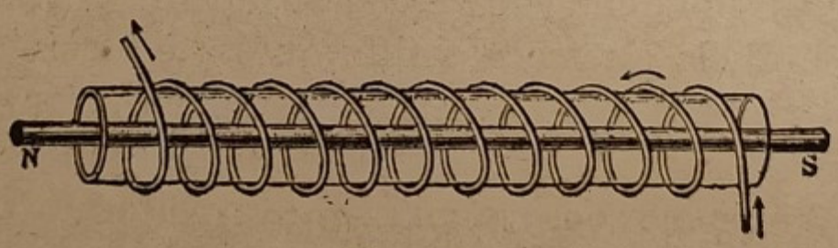


Fig. 415.

l'asse magnetico della calamita che si forma è diretto secondo le linee di forza del campo.

Per conseguenza, una sbarretta di ferro dolce, messa dentro un tubo di vetro, su cui è avvolto un solenoide fatto avvolgendovi ad elica un filo di rame percorso da una corrente, si magnetizza presentando il suo polo nord dalla stessa parte dove si trova il polo nord del solenoide (fig. 415). La calami-

tazione della sbarra cessa al cessare della corrente se è di ferro dolce, permane se è d'acciaio.

Il sistema ora accennato costituisce una elementare *elettrocalamita.*

Infatti questo apparecchio è formato di un *nucleo di ferro dolce attorno al quale è avvolto un filo di rame isolato.* Al passaggio della corrente il nucleo si magnetizza, e la magnetizzazione cessa quasi del tutto al cessare della corrente e cambia senso se si cambia il senso della corrente.

Il filo magnetizzante di rame isolato è di solito avvolto sopra un rocchetto, formato di sostanza non magnetica, nè più nè meno come è avvolto il filo da cucire sui rocchetti comuni.

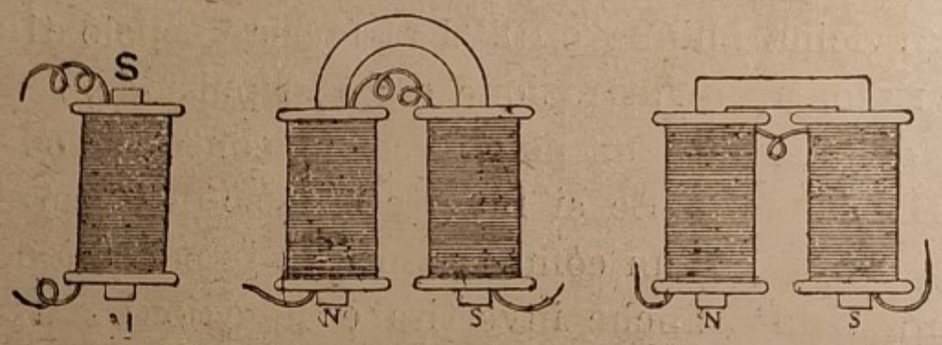


Fig. 416. Fig. 417. Fig. 418.

Nella cavità è impegnata una sbarra di ferro dolce; si ha così una elettrocalamita *semplice* (fig. 416).

Ma poichè il più delle volte è utile usufruire dell'azione di ambedue i poli della elettrocalamita, questa è formata a *ferro di cavallo* (fig. 417 e 418). I due rocchetti magnetizzanti devono in tal caso essere percorsi dalla corrente in quel senso che desti ad un estremo un polo nord e all'altro un polo sud. In pratica la questione si risolve con qualche tentativo, determinando il nome dei due poli coll'avvicinarvi un comune ago di declinazione.

Mediante le elettrocalamite si possono produrre campi magnetici di grande intensità, molto superiore a quelli dati dalle calamite permanenti. Con elettrocalamite speciali si possono ottenere dei campi che in spazio ristretto raggiungono il valore di 75 mila gauss (208).

Una elettrocalamita è destinata d'ordinario ad agire sopra una sbarra di ferro dolce, detta *àncora*, posta davanti ai suoi poli. L'àncora si magnetizza per induzione, sviluppandosi in

essa due poli di nome contrario a quelli della elettrocalamita che le stanno di fronte.

Si produce per conseguenza un'attrazione sull'àncora che può in certi casi venire anche a contatto dei poli; in tal caso può sostenere senza staccarsi un peso considerevole (fig. 419).

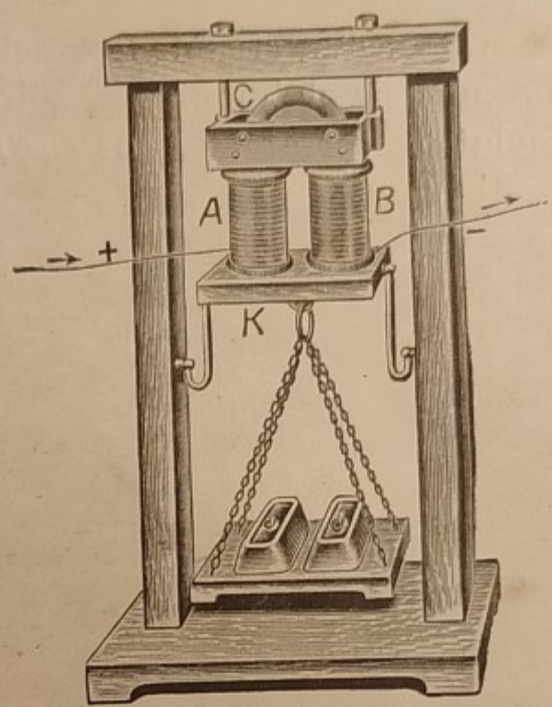


Fig. 419.

La forza d'attrazione esercitata da una elettrocalamita sopra un'àncora che sta a contatto dei poli si dice *forza portante*, che, come dimostra la teoria, è tanto più grande quanto più grande è la sezione del nucleo di ferro e quanto più corto è il suo asse.

Inoltre la forza portante è proporzionale al quadrato degli *amperspire*, cioè del prodotto Ni del numero dei giri del filo per l'intensità della corrente.

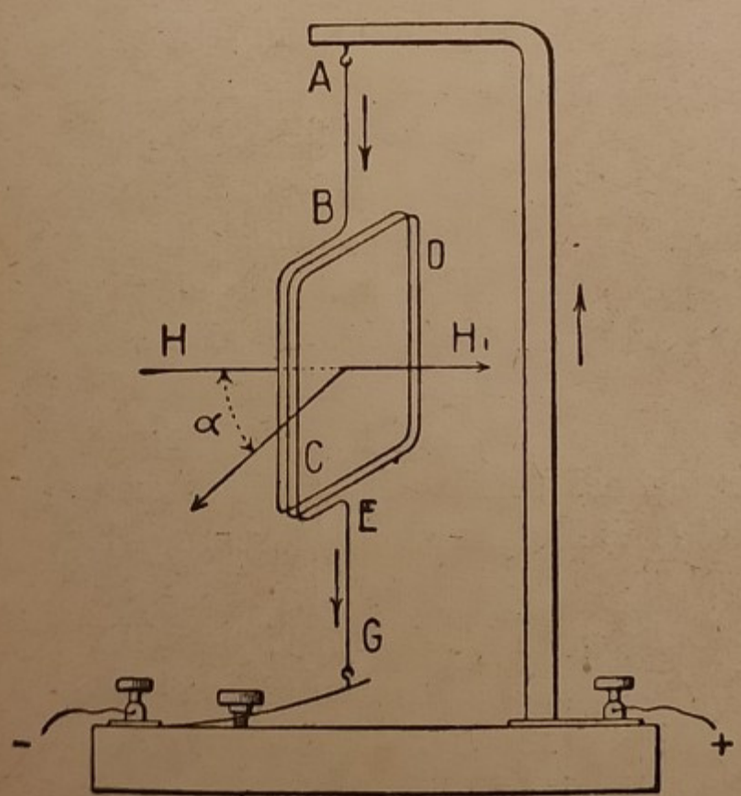


Fig. 420.

Strumenti di misura.

279. Galvanometri.—Servono a misurare o più spesso ad accusare delle correnti di debolissima intensità dell'ordine di qualche millesimo di ampère. Si fondano sulla azioni mutue delle correnti e delle calamite.

Lasciando la descrizione dei primi apparecchi che come il galvanometro del Nobili sono stati un sussidio validissimo in molte ricerche scientifiche nel secolo scorso, diamo

un breve cenno del galvanometro *Deprez-D'Arsonval* ancora molto adoperato nei laboratori.

In queste strumento, schematizzato nella figura 420, si ha un avvolgimento a spire rettangolari di filo di rame isolato e serrate fra loro *BCDE*, i cui capi sono uniti a due fili metallici *AB*, *EG* verticali e sul prolungamento l'uno dell'altro, fissati in *A* e *G*. Ammettiamo che il piccolo telaio descritto si trovi in un campo magnetico uniforme di cui le linee di forza HH_1 sieno orizzontali. Facendo passare una corrente nel telaio mobile, essendo esso equiparabile com'è noto (276) ad una lamina magnetica, tenderà a disporsi *perpendicolarmente* al campo HH_1 e a volgere la sua faccia nord dalla parte di H_1. Il telaio ruoterà così attorno all'asse *AG torcendo* i fili di sospensione *AB* ed *EG*, finchè l'azione dovuta alla reazione elastica che in essi si desta, farà equilibrio all'azione fra il campo generato dalla corrente che circola nel telaio e il campo esterno. Si capisce che la rotazione del telaio crescerà al crescere della intensità della corrente.

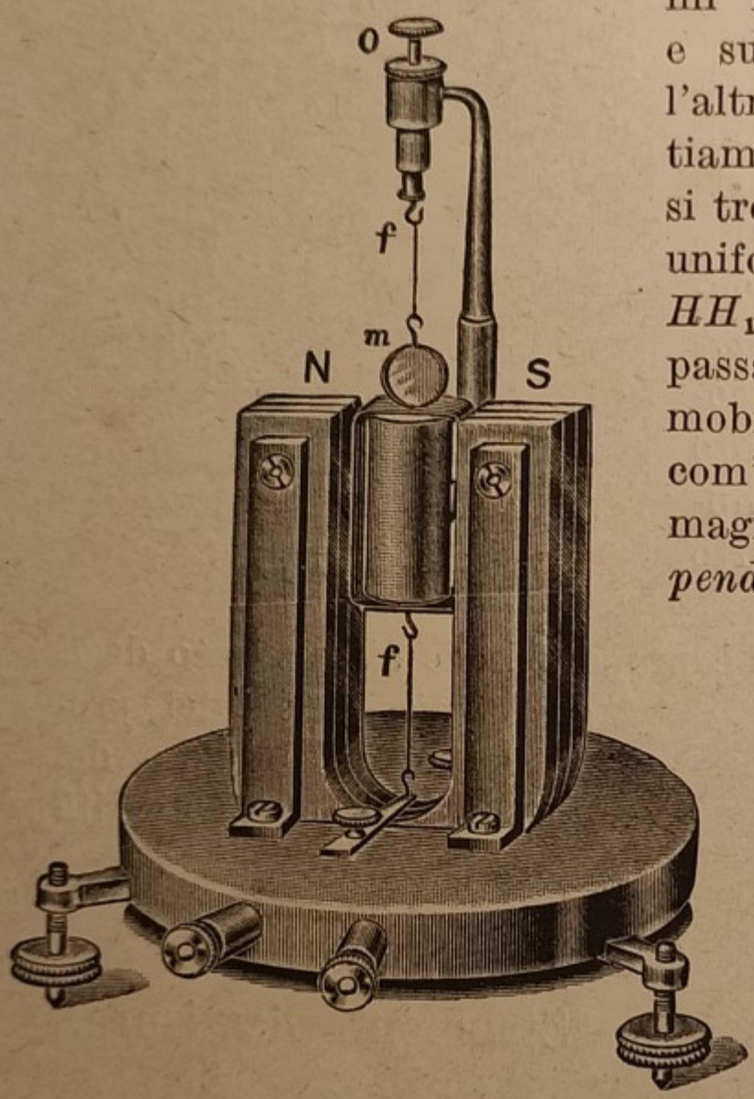


Fig. 421.

Nel galvanometro Deprez-D'Arsonval (fig. 421) viene utilizzato il fenomeno descritto. L'apparecchio è formato di una forte calamita permanente a ferro di cavallo *NS*, fissata verticalmente sopra una base, munita di viti di livello. Nello spazio compreso fra le due branche, dove si ha un campo sensibilmente uniforme, si trova un piccolo telaio, mobile come quello ora descritto. I fili di sospensione di argento *ff* sono in comu-

nicazione con due morsetti fissati sulla base isolante, e il filo di sospensione superiore è fissato in alto a una morsetta fatta di due pezzi. Girando l'uno, in un senso o nell'altro, si può sollevare od abbassare qualche po' il telaio mobile, con che, variando la tensione dei fili di sospensione, ne varia la reazione elastica e per conseguenza la sensibilità dell'apparecchio. Coll'altro, si può girare il telaio mobile intorno all'asse verticale che comprende i fili di argento, per disporlo, quando non passa corrente, sensibilmente parallelo alle linee di forza della calamita.

La sensibilità dell'apparecchio è aumentata fissando dentro il telaio, in modo però da non ostacolarne il movimento, un cilindro di ferro dolce, che per effetto della permeabilità magnetica (207) rende più intenso il campo della calamita nelle vicinanze del telaio.

Il galvanometro descritto ha una sensibilità sufficiente per molte ricerche di laboratorio ed è preferito ed altri per essere robusto e *aperiodico*, vale a dire il telaio mobile prende istantaneamente, *senza oscillare*, la posizione che gli spetta. Il fenomeno trova la sua spiegazione nello studio dell'induzione elettromagnetica che verrà fatto in seguito.

Per misurare con precisione la deviazione si unisce al telaio mobile uno specchietto *m* molto leggero, sul quale si fa riflettere un raggio di luce, e si misura lo spostamento della macchia luminosa prodotta dal raggio riflesso sopra uno schermo situato alla distanza di qualche metro. Essendo nota questa distanza, si può con facile calcolo ottenere il valore della deviazione anche se questa è assai piccola.

280. Amperimetri e voltmetri. — Sono apparecchi di tipo industriale per la misura della intensità della corrente e della d. d. p. Sono meno sensibili dei galvanometri, per compenso sono più robusti, facilmente trasportabili, funzionano di solito in tutte le posizioni e non sono influenzati da campi magnetici che possono destarsi in loro vicinanza per effetto di correnti o di calamite.

In un tipo molto diffuso di *amperimetro* troviamo due calamite *NSNS* piegate a **C** e disposte simmetricamente in modo

che i loro quattro poli si trovino sui vertici di un rettangolo (fig. 422). Nello spazio compreso fra i poli si genera quindi un campo magnetico presso a poco uniforme colle linee di forza dai poli *N* ai poli *S*. Fra i detti poli c'è un avvolgimento di filo di rame isolato fatto sopra un rocchetto *RR*, con l'asse disposto un po' obliquo rispetto le linee di forza. Dentro il solenoide trovasi una sbarretta di ferro dolce *a*, detta ago, girevole intorno ad un asse perpendicolare all'asse del solenoide e al piano dei quattro poli. La sbarretta, sotto l'azione del campo delle calamite si dispone parallela alle linee di forza e allora un leggero indice di alluminio, unito all'ago, segna zero sulla graduazione. Se si fa passare una corrente l'ago tende a disporsi secondo l'asse del rocchetto per azione del campo che la corrente vi genera (277), ma a tal movimento si oppone l'azione del campo delle calamite fisse, sicchè in tutti i casi l'ago si mette in equilibrio sotto l'azione combinata dei due gruppi di forze antagoniste, deviando tanto più quanto maggiore è l'intensità della corrente.

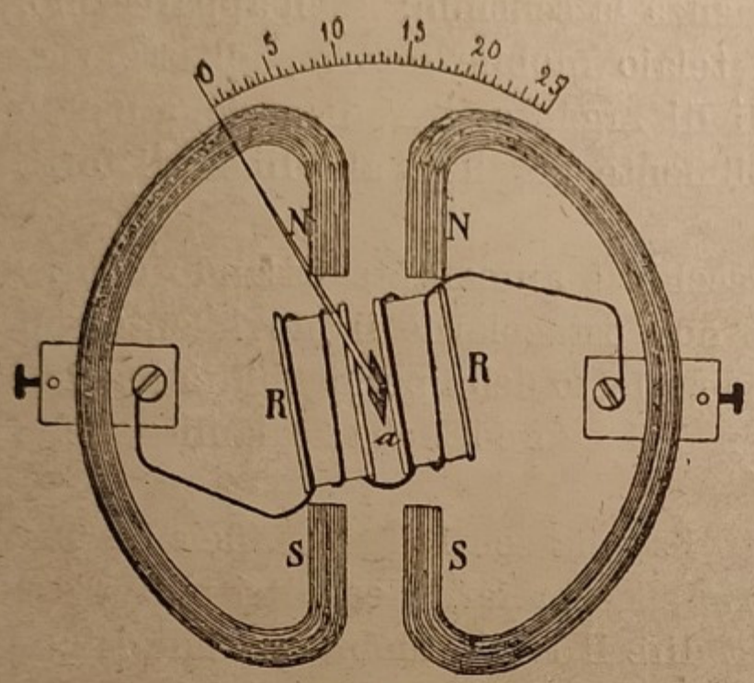


Fig. 422.

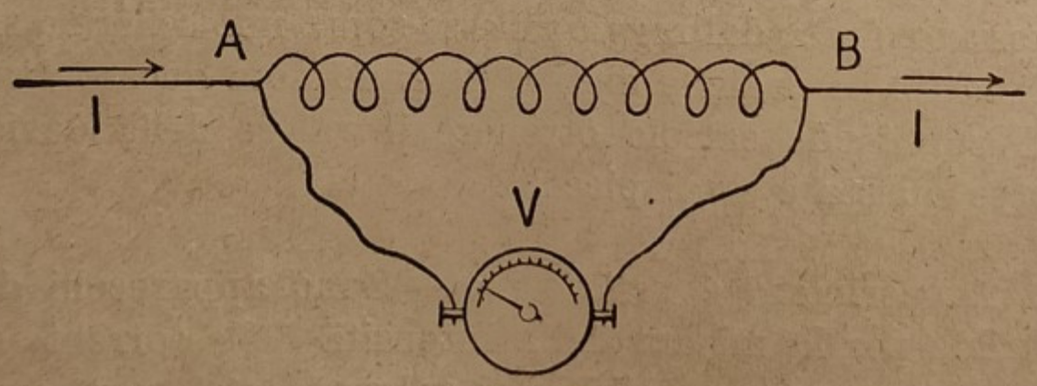


Fig. 423.

La graduazione dell'apparecchio viene fatta confrontandolo con un apparecchio campione, o con processi fondati sulle leggi della elettrolisi (251).

Il *voltmetro* ha in sostanza la struttura di un amperimetro ed è destinato a misurare la d. d. p. fra due punti A e B di un circuito. Esso è inserito in V come indica la figura 423, in derivazione sui punti stessi ed ha un circuito di grandissima resistenza, di modo che la corrente che lo attraversa ha una intensità assai debole, per la legge dei circuiti derivati (266) e non viene così alterato il primitivo regime nel resto del circuito,

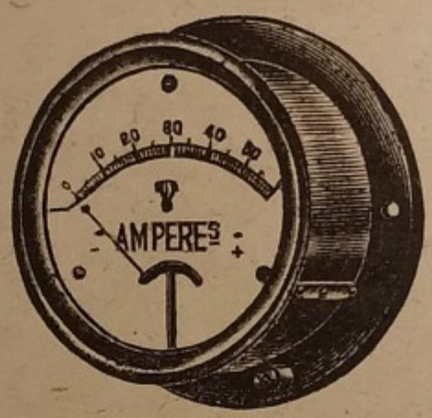


Fig. 424.

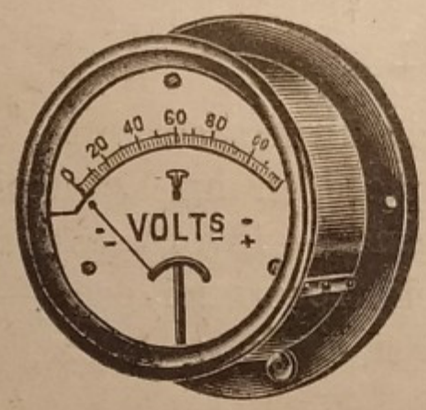


Fig. 425.

vale a dire la d. d. p. fra A e B rimane la stessa che ci sia o non ci sia lo strumento.

Se R è la resistenza dell'avvolgimento del voltmetro e I l'intensità della corrente che lo attraversa, si ha (264):

$$V_A - V_B = IR.$$

Per conseguenza le deviazioni dell'apparecchio, che dipendono in realtà dalla intensità della corrente, risultano proporzionali alla d. d. p. cercata, e il valore di questa si ha in ogni caso, facendo il prodotto di I per R.

Ma il voltmetro ci dispensa dall'eseguire tale moltiplicazione, perchè esso non porta le indicazioni dell'intensità, ma del prodotto IR che misura in realtà la d. d. p. cercata.

Le figure 424 e 425 riproducono un amperimetro e un voltmetro nel loro aspetto esterno.

Infine lo schema della figura 426 illustra il modo come sono inseriti in circuito i due apparecchi; in essa $L_1 L_2$ rappresentano i due conduttori principali — i fili di linea — che vengono dai poli del generatore G. Il voltmetro V è posto *in derivazione* su due punti dei fili L_1 e L_2 e l'amperimetro A è messo su uno dei due fili *in serie*. Dopo l'amperimetro sono posti in derivazione sui fili principali gli apparecchi di utilizzazione BB.

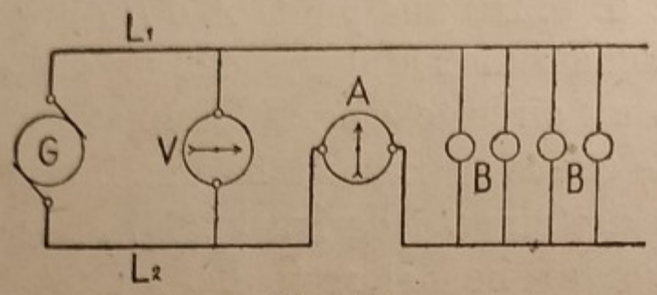


Fig. 426.

281. Energia e potenza di una corrente - Wattmetri. — L'energia di una corrente, ossia il lavoro L che essa è capace di compiere, in un determinato conduttore, sotto una qualsiasi forma — lavoro meccanico nei motori, calore negli apparecchi elettrotermici, ecc. — è misurato colla formola del § 237 che qui si riporta:

$$L = M\,(V_A - V_B) \qquad (1)$$

nella quale M è la quantità di elettricità che attraversa il conduttore misurata in coulomb, e $V_A - V_B$ la d. d. p. ai capi del conduttore stesso, misurata in volta. Il lavoro L è allora misurato in joule.

Ricordando poi che $M = It$ (238), dove I è l'intensità della corrente in ampère e t il tempo in secondi, la formola (1) diventa:

$$L = I\,(V_A - V_B)\,t. \qquad (2)$$

Dunque *il lavoro, misurato in joule, che una corrente produce in un dato conduttore, è eguale al prodotto dell'intensità della corrente in ampère, per la d. d. p. ai capi del conduttore misurata in volta, per la durata della corrente misurata in secondi minuti.*

Infine, ricordando che la potenza W di un motore, misurata in watt, è il lavoro in joule prodotto in un secondo, cioè:

$$W = \frac{L}{t}$$

essendo L il lavoro compito in t secondi, tenendo presente la (2) si ottiene:

$$W = I\,(V_A - V_B). \qquad (3)$$

Dunque *la potenza elettrica impegnata in un dato conduttore, misurata in watt, è data dal prodotto della intensità di corrente che lo attraversa misurata in ampère per la d. d. p. esistente ai suoi estremi misurata in volta.* Per conseguenza le indicazioni separate di un voltmetro e di un amperimetro bastano allo scopo. Però nella tecnica esistono degli apparecchi — *wattmetri* — che con una sola lettura dànno il valore di detta potenza.

La corrente negli aeriformi.

282. Ionizzazione nei gas. — Un gas nelle condizioni ordinarie è ritenuto praticamente isolante, ma in determinate condizioni può anche divenire conduttore. Tuttavia perchè ciò avvenga è necessario la presenza nel gas di *ioni* (240), i quali possono essere originati da diverse cause. In tal caso il passaggio dell'elettricità nei gas ha carattere convettivo, cioè avviene per movimento di ioni come nelle soluzioni degli elettroliti.

Per comprendere il meccanismo del passaggio della corrente attraverso i gas occorre che ci riferiamo a quanto è stato esposto nel § 240, dov'è in succinto esposta la teoria elettronica. Ricordiamo che gli atomi e le molecole sono formati da corpuscoli carichi di elettricità dei due segni e risultano elettricamente neutri, perchè tali cariche sono quantitativamente eguali. In certe circostanze però un atomo o una molecola possono perdere o acquistare degli elettroni, ossia dei corpuscoli negativi, dimodochè restano allora carichi positivamente o negativamente, diventando ioni. Il fenomeno avviene largamente nelle soluzioni degli elettroliti (256).

Un gas che contiene un numero rilevante di ioni si dice *ionizzato*. Un gas, per esempio l'aria, contiene sempre ioni, pochi in via normale, dovuti a cause diverse, dimodochè producendo in esso un forte campo elettrico mediante due conduttori, abbastanza vicini, portati a una grande d. d. p., le forze attive nel campo spingono violentemente i ioni positivi verso

il conduttore a potenziale più basso, comunemente detto negativo, e quelli negativi verso l'altro. Questi ioni nel loro rapido moto urtano contro le molecole dell'aria ambiente e le spezzano, producendo per *urto* nuovi ioni. Questi alla lor volta, accelerando il loro moto per effetto delle grandi forze attive nel campo, ripetono il fenomeno su altre molecole d'aria, sicchè in brevi istanti si hanno numerosissimi ioni moventisi con grandissima velocità nei due sensi, e sono gli urti violenti fra le due specie di ioni che costituiscono appunto la scintilla, che come si sa scocca nell'aria fra i due conduttori portati a una sufficiente d. d. p. Anche il fenomeno dell'arco elettrico (271) è un caso tipico del passaggio della corrente attraverso ai gas.

La ionizzazione dei gas però avviene oltre che per urto anche per altre cause:

1° per *riscaldamento*; tutti i corpi arroventati, comprese le fiamme, producono ioni;

2° per effetto dei *raggi ultravioletti* (197);

3° per effetto dei *raggi X* (286) e di radiazioni speciali emesse dai così detti corpi *radioattivi* (324).

283. Scintilla nell'aria. — La scintilla, come si è detto, scocca fra due conduttori abbastanza vicini portati a una sufficiente d. d. p.

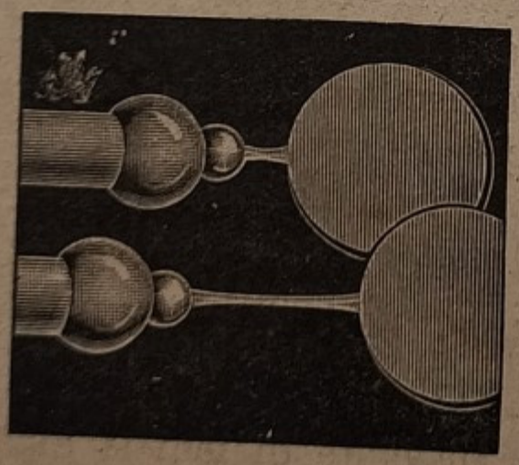


Fig. 427.

La lunghezza della scintilla, detta *distanza esplosiva*, cresce colla d. d. p. a cui i corpi vengono portati ed è provato che per avere una scintilla anche corta nell'aria, occorre una d. d. p. di parecchie migliaia di volta.

Lo spessore, la luminosità e il rumore della scintilla crescono colla quantità di elettricità che passa.

La scintilla che scocca fra due conduttori vicini di grande capacità è una striscia, bianco-azzurrognola, rettilinea (fig. 427).

Se la capacità dei conduttori diminuisce e cresce la distanza, la scintilla diviene sottile e ramificata (fig. 428); come si manifesta spesso nei lampi temporaleschi. La durata della scintilla è dell'ordine di un millesimo di secondo.

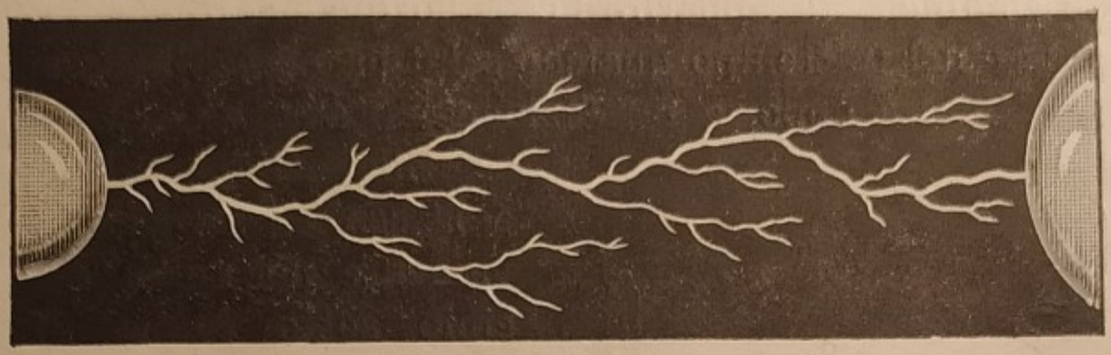


Fig. 428.

284. Scariche nei gas rarefatti. — In un gas rarefatto le condizioni di mobilità dei ioni esistenti sono evidentemente diverse da quelle possedute alla pressione normale; e in tal caso il movimento dei ioni, provocato da un campo elettrico, dà luogo a fenomeni luminosi speciali interessantissimi.

Prendiamo un tubo di vetro (fig. 429) lungo da un metro a due metri, della grossezza di un dito. Alle estremità si trovano due elettrodi d'alluminio *A* e *B* che comunicano con due occhielli esterni coll'intermedio di un breve tratto di filo di platino saldato nel vetro. Gli elettrodi *A* e *B* finiscono internamente con un dischetto di alluminio posto perpendicolare all'asse del tubo. Verso la metà, il tubo porta un'apertura *C*, la quale può mettersi in comunicazione con una macchina pneumatica.

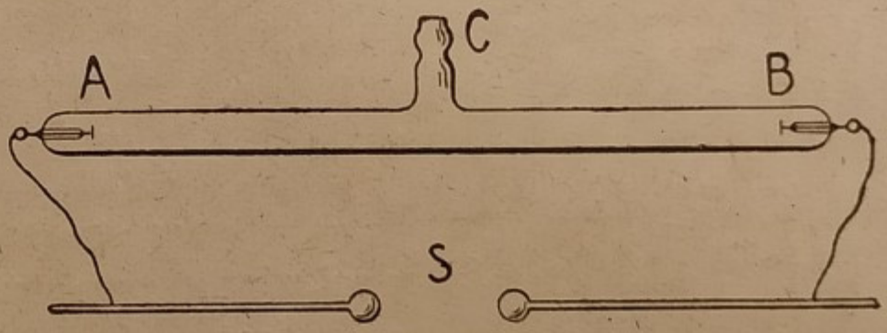


Fig. 429.

I due elettrodi *A* e *B* sono rispettivamente uniti a due asticelle metalliche terminanti con due sferette *S* poste alla distanza di qualche centimetro. Il sistema delle due sferette è detto *spinterometro*. Se ora si congiungono i due elettrodi coi poli di una sorgente — macchina elettrostatica o rocchetto di Ruhmkorff (292) — che li porti a una d. d. p. di qualche migliaio

o di qualche decina di migliaia di volta, prima che la macchina pneumatica entri in funzione, si vedono scoccare le scintille solo fra le sferette dello spinterometro e niente apparisce dentro il tubo. Messa in funzione la macchina, ad un certo istante comincia ad apparire nel tubo qualche fugace striscia luminosa e nel frattempo qualche scintilla manca nello spinterometro. Subito dopo, a rarefazione più avanzata, cessano le scintille nello spinterometro, e la scarica avviene esclusivamente nel tubo, da principio sotto forma di una striscia luminosa di color porpora, qualche po' sinuosa, ma piuttosto sottile, come un nastro, d'onde il nome di *scarica a nastro*, attaccata cogli estremi agli elettrodi.

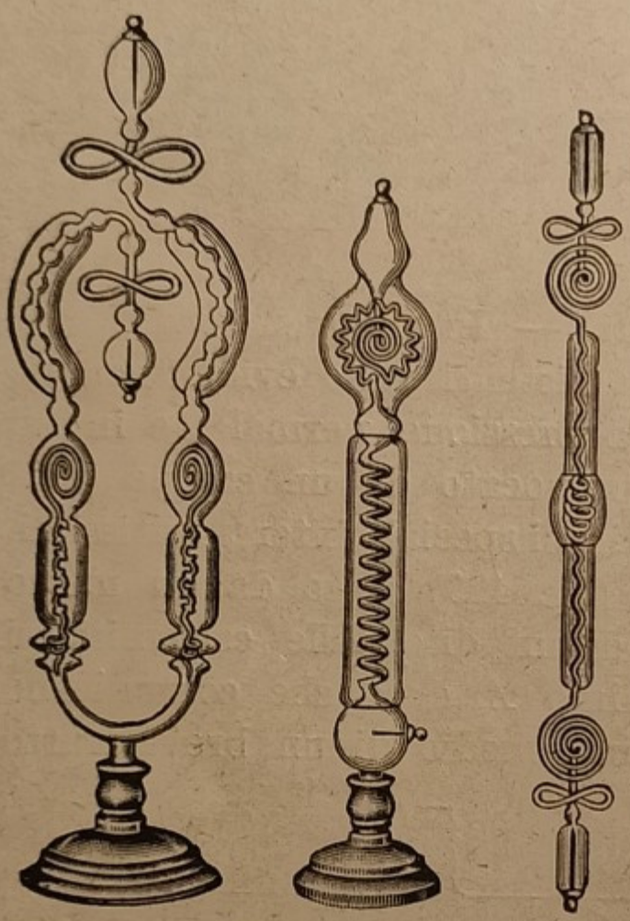


Fig. 430.

Spingendo di più la rarefazione, il nastro luminoso diventa rettilineo, si allarga e assume una tinta più chiara, di color rosa; poi la luminosità occupa tutto il tubo, mostrando che il numero dei ioni, che coi loro urti provocano manifestazioni di luce, cresce colla rarefazione.

Man mano che la rarefazione aumenta la luminosità nel tubo si modifica, la luce ritirandosi via via verso l'elettrodo positivo, finchè a una pressione inferiore a 1 millesimo di millimetro di mercurio ogni luce interna sparisce.

Se il tubo è pieno di gas diversi dall'aria il fenomeno si compie con le stesse modalità, solo che da gas a gas cambia il colore della luce.

Da moltissimo tempo erano noti ai Fisici i *tubi Geissler*, dalle forme più svariate (fig. 430) con pressione interna di qualche millimetro di mercurio. La scarica li illumina in tutta la loro lunghezza offrendo dei graziosi effetti. Questo fenomeno

è oggi utilizzato coi tubi al *neon*, che si illuminano di una intensa luce rosso-aranciata, per la pubblicità luminosa.

I fenomeni descritti trovano la loro spiegazione nel moto dei ioni provocato dalle forze del campo elettrico fra i due elettrodi del tubo. A pressione molto elevata i ioni in moto incontrano sul loro cammino molte molecole d'aria, e vengono frenati per gli urti contro le molecole stesse, senza poter raggiungere la velocità sufficiente a formare nuovi ioni spezzando le molecole contro cui urtano. Diminuendo la pressione dell'aria diminuisce il numero degli urti contro le molecole e i ioni in moto acquistano la velocità atta a spezzare le molecole incontrate e a produrre nuovi ioni permettendo così il passaggio della corrente da un elettrodo all'altro. Infine quando la rarefazione del gas è molto spinta, i ioni in moto, pur acquistando una grande velocità, non producono più nuovi ioni per la mancanza o quasi di molecole d'aria e quindi non può aversi la scarica.

285. Raggi catodici. — Un fenomeno interessantissimo si presenta in un tubo di scarica quando la rarefazione raggiunge

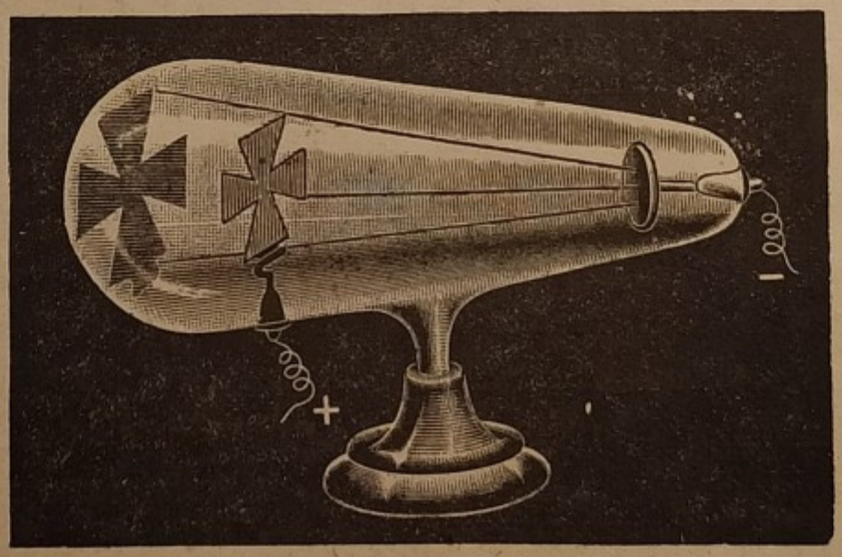


Fig. 431.

un grado abbastanza elevato non però tale da impedire il passaggio della scarica. Serve bene alla dimostrazione il tubo della fig. 431. Mentre coll'aumento della rarefazione la luminosità interna va sparendo, nella regione del tubo opposta al catodo apparisce una viva fluorescenza verdastra.

Il fenomeno è dovuto a particolari radiazioni che provengono dal catodo e che vanno a urtare violentemente contro il vetro. Tali radiazioni sono dette *raggi catodici*. Questi sono traiettorie di elettroni espulsi dal catodo e che respinti da questo, perchè carichi negativamente, seguendo un cammino approssimativamente rettilineo, urtano violentemente contro il vetro destandovi la fluorescenza.

Il percorso rettilineo dei raggi catodici è dimostrato con una speciale disposizione del tubo. Esso porta nell'interno una lamina di alluminio tagliata in forma di croce di Malta, unita col supporto a cerniera; l'anodo può essere collocato in qualunque punto, e può funzionare da anodo la croce stessa.

Quando la croce è in piedi, se ne vede spiccare nettamente l'ombra geometrica sul fondo luminoso verde del vetro; quando poi la si abbatte, comparisce al posto dell'ombra una croce luminosa che spicca sul fondo meno luminoso del vetro, mostrando che la proprietà fluorogenica del vetro si affievolisce. Il vetro, per così dire, si stanca come si stanca la nostra retina esposta a luce troppo vivace.

Il formarsi dell'ombra netta della croce attesta che i raggi catodici, ossia le traiettorie degli elettroni, sono rettilinei.

Fra i diversi effetti prodotti dai raggi catodici enumeriamo i principali.

1° *I raggi catodici sono deviati da una calamita*, come si può provare col tubo a pera della fig. 431, nel quale avviene che l'ombra della croce resta immobile sul fondo del tubo nelle condizioni ordinarie, ma si sposta e si deforma notevolmente solo che si muova uno dei poli di una calamita vicino al tubo.

Se poi si tien conto del senso dello spostamento dell'ombra prodotto disponendo lateralmente al tubo i poli di una calamita a ferro di cavallo, si riscontra che la deviazione avviene normalmente alla direzione del campo magnetico come se si trattasse di un filo flessibile percorso da una corrente elettrica diretta verso il catodo.

2° *I raggi catodici sono capaci di effetti meccanici.* — Lo si dimostra col tubo della figura 432, nel quale si trova un leggero mulinello in vetro con alette di mica che può girare e correre su due guide di vetro. I due elettrodi sono posti su di una retta che sta sopra l'asse del tubo, di modo che quando avviene la scarica i raggi catodici, nel loro percorso rettilineo, investono le alette superiori del mulinello; questo allora si mette a girare spostandosi dal catodo verso l'anodo. Invertendo la polarità del tubo il mulinello assume un moto in senso contrario.

3° *I raggi catodici hanno azione fosforescente e fluorescente.* — Già si è visto che il

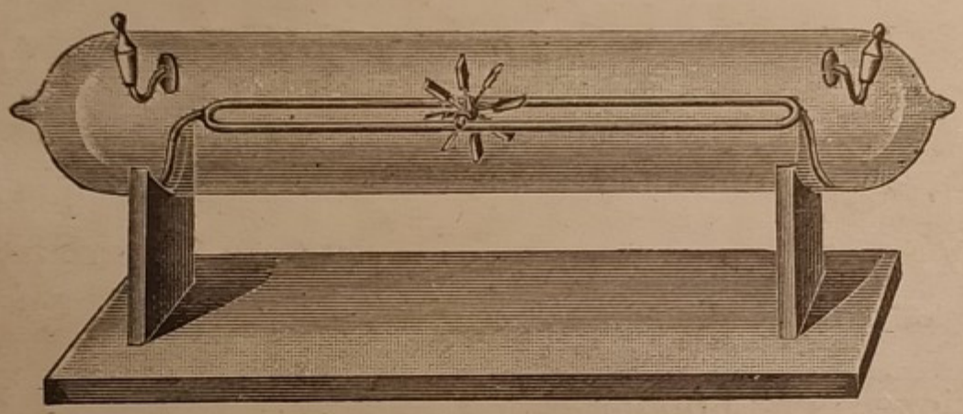


Fig. 432.

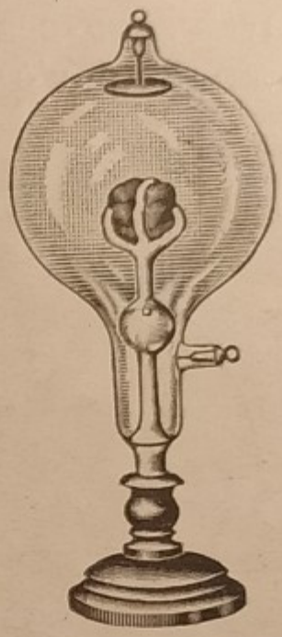


Fig. 433.

vetro del tubo a pera diventava fluorescente nella regione anticatodica; il colore della luce varia colla qualità del vetro; è verde-pomo col vetro di Germania, e azzurro col vetro inglese.

Ma anche molte altre sostanze brillano di vivissima e svariata luce quando sono colpite dai raggi catodici. Per tali esperienze la sostanza è sostenuta da un gambo di vetro entro un tubo che ha il catodo in alto (fig. 433).

Di solito cessata la scarica, il corpo rimane ancora per qualche tempo luminoso in grazia a un fenomeno di fosforescenza.

Che i raggi catodici siano degli elettroni in moto è messo fuor di dubbio da molte prove; e da apposite misure si è anche constatato che la loro massa e la loro carica sono eguali alla massa e alla carica trovate per l'elettrone in altri fenomeni. La velocità dei raggi catodici è compresa fra 100 km. e un numero prossimo a quello della velocità della luce.

286. Raggi X. — Questi raggi, detti anche *raggi Roentgen*, dal nome del fisico tedesco che li scoprì (1895), sono radiazioni di natura ondulatoria come la luce, e si propagano come questa per onde e si differenziano dai raggi luminosi solo per avere una lunghezza d'onda estremamente più breve.

I raggi X hanno origine da qualunque corpo investito dai raggi catodici. Quando un elettrone, come quelli che costituiscono i raggi catodici, urta violentemente contro un ostacolo che lo arresta, provoca nell'etere una scossa per effetto della quale, dal punto dov'è avvenuto l'urto, parte un sistema di onde sferiche che si propagano dentro il tubo e anche all'esterno. La regione anticatodica fluorescente nel tubo a pera, precedentemente descritto, è quindi una sorgente di raggi X; ma una produzione più abbondante si ha con tubi speciali.

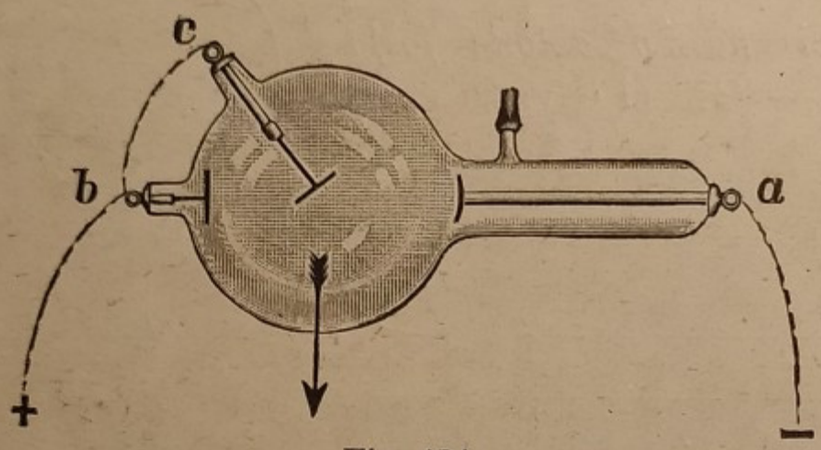


Fig. 434.

Nel tubo della figura 434 il catodo *a* termina nell'interno con una calotta concava di alluminio; gli altri due elettrodi *b* e *c*, uniti fra loro esternamente, funzionano insieme da anodo. Uno di questi arriva quasi al centro del tubo, terminandovi con un dischetto di alluminio, ricoperto con una lamina di platino, disposto a circa 45° sull'asse *ab* del tubo.

I raggi catodici emessi dalla calotta di alluminio s'incontrano nel mezzo della lastrina di platino, e i raggi X generati da questa formano un fascio conico, avente per asse la freccia, attraversano il vetro rendendolo fluorescente e passano all'esterno.

Oggi si usano tubi assai più efficaci, dei quali non possiamo occuparci.

Nei raggi X sono state riscontrate le proprietà seguenti:

1° *Ionizzano fortemente i gas che attraversano.*

2° *si propagano in linea retta e non subiscono deviazione nè in un campo magnetico nè in un campo elettrico.* Non sono

dunque traiettorie di corpuscoli elettrizzati, nè positivi nè negativi;

3° *vengono più o meno assorbiti dai corpi che incontrano*; vale a dire, i corpi sono meno o più trasparenti a tali raggi. Alcuni, opachi praticamente per la luce ordinaria, come il legno, la carta, i tessuti vegetali e animali, sono abbastanza trasparenti ai raggi X anche sotto forte spessore.

4° *Destano la fluorescenza su certe sostanze che ne sono colpite* e con notevole intensità sopra il platinocianuro di bario.

5° *Esercitano una forte azione chimica*, come la luce ordinaria, sui composti di argento.

I metalli leggeri, quali l'alluminio, sono discretamente trasparenti anche in lamine alquanto spesse; i metalli pesanti, quali il piombo e il platino, sono quasi opachi anche sotto piccolo spessore.

Tenendo conto di ciò, si comprende cosa avviene quando un tubo generatore di raggi X vien posto dietro lo schermo fluorescente, e fra il tubo e lo schermo si pongono degli oggetti che nelle loro diverse parti presentano una differente trasparenza ai raggi X. Un borsellino comune di cuoio lascia nettamente vedere le monete contenute, una mano l'ombra netta dello scheletro che spicca sull'ombra leggera della carne. Anche gli organi molli, il cuore, il fegato, i polmoni riescono visibili sullo schermo e il medico può trarre dal detto esame indizi spesso sicuri su certe malattie degli organi stessi.

Lo sperimentatore deve però durante tale esame prendere le necessarie precauzioni per non subire l'azione dei raggi X che attraversato lo schermo lo investono. A lungo andare i tessuti colpiti dai raggi X riescono profondamente lesi, spesso con esito mortale. Per prevenire questo gravissimo inconveniente la superficie fluorescente è coperta da uno spesso vetro ricco di piombo molto meno trasparente del vetro ordinario a tali raggi; ma quando si usano dei tubi molto potenti bisogna ricorrere ad altri mezzi di protezione più sicuri.

Quando il medico eseguisce un esame del genere descritto, si dice che fa una *radioscopia*. Ma le ombre radioscopiche possono anche essere stabilmente fissate, basta sostituire allo schermo al platinocianuro una lastra fotografica, secondo la

disposizione della figura 435. *T* è il tubo a raggi X, *C* una scatola di cartone contenente la lastra fotografica con lo strato sensi-

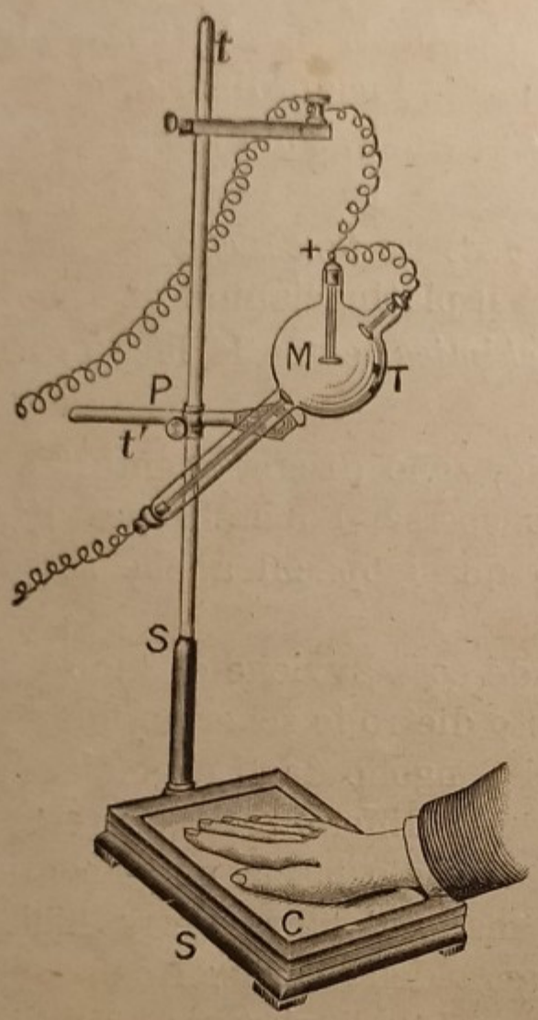


Fig. 435.

Fig. 436.

bile rivolto in alto; sopra è posata la mano. Il cartone essendo ben trasparente ai raggi X, sviluppata la lastra, si ha la *radiografia* della mano, e se eventualmente in essa si trovasse un corpo estraneo metallico, oltre lo scheletro apparirebbe anche il corpo stesso.

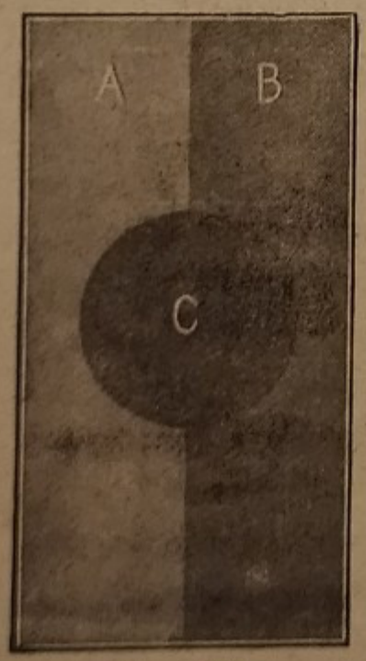


Fig. 437.

Nella figura 436 un piccolo proiettile è nettamente visibile alla base del quarto metacarpo.

La figura 437 è la radiografia di 3 pezzi metallici; la striscia *A* è l'ombra lasciata da una lamina di alluminio di 4 mm. di spessore, *B* quella di una lastrina di piombo spessa $^{15}/_{100}$ di mm, *C* di una moneta di nichelio da 1 lira.

L'assorbimento dei raggi X operato dall'alluminio è assai minore del piombo malgrado uno spessore 27 volte maggiore.

La figura 438 è la radiografia di un paio di occhiali nella loro busta di cuoio che non appare quasi. Le figure precedenti riproducono le fotografie positive delle radiografie originali; quello che nelle figure è nero nelle radiografie era chiaro e inversamente. La dimostrazione che la natura dei raggi X è identica a quella della luce fu data solo nel 1913 da Laue, provando che tali raggi, attraversando o riflettendosi sopra i cristalli, ripetevano tutti i fenomeni offerti dalla luce. I raggi X hanno una lunghezza d'onda compresa fra limiti assai estesi, cioè fra 0,0012 μ e 0,0000072 μ. Verso il limite superiore stanno i raggi X *molli* ossia poco penetranti, verso quello inferiore i raggi X *duri* molto penetranti.

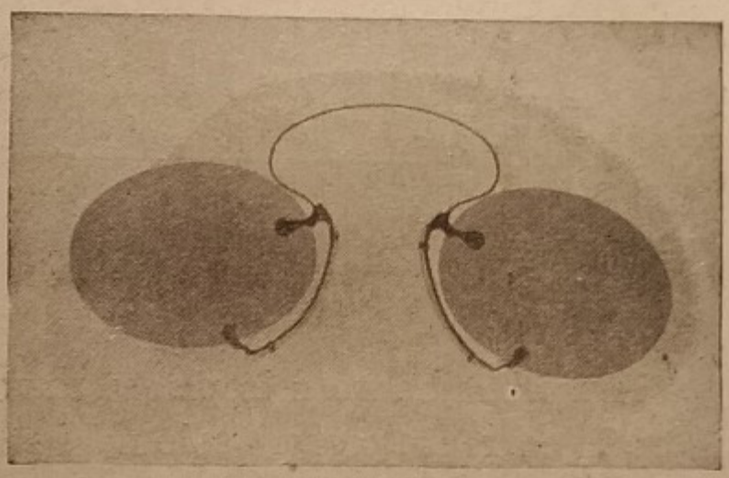


Fig. 438.

287. Fenomeni termoionico e fotoelettrico. — È provato che *un qualunque corpo incandescente e particolarmente un metallo emette elettroni.* È questo il *fenomeno termoionico*, detto anche *effetto Edison*, essendo stato scoperto da questo insigne scienziato nel 1890. In una lampada a incandescenza a filamento di carbone, com'erano le lampade Edison, si trova una laminetta metallica — placca — di fronte all'ansa del filamento (fig. 439). In P è schematizzata la sorgente che rende incandescente il filamento, in *G* un galvanometro. Occorre che il filo che mette in circuito la placca e il galvanometro sia unito al polo positivo della sorgente *P*. Si osserva che essendo la lampada spenta, il galvanometro rimane a zero, ma se il filamento diviene incandescente il galvanometro accusa una corrente diretta dalla placca al filamento. Avviene che lo spazio tra la

placca e il filamento rovente diventa conduttore per il flusso di elettroni emessi dal filamento e attirati verso la placca positiva.

Se uniamo il filo che viene dal galvanometro al polo negativo della pila P, la placca assumendo da questa una carica negativa respinge verso il filamento gli elettroni da questo emessi, e non si ha passaggio di corrente. Una lampada del genere, meglio se il filamento è di tungsteno, funziona diremo così, da *valvola* permettendo il passaggio della corrente solo in un verso — dalla placca al filamento — e per questa proprietà, in molte occasioni è usata per raddrizzare una corrente alternata (295). Se infatti fra il filamento e la placca manteniamo una d. d. p. alternata, la corrente passerà solo nel semiperiodo in cui la placca si trova a potenziale più alto del filamento.

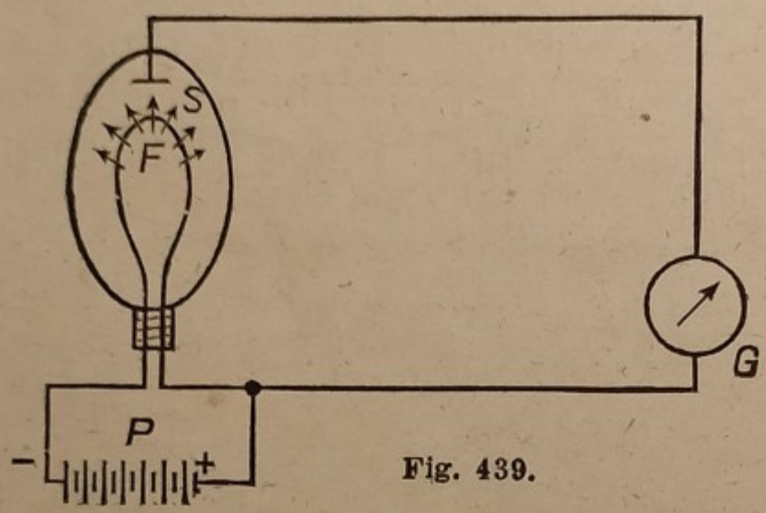


Fig. 439.

In tutte le lampade usate negli apparecchi radioriceventi si sfrutta il fenomeno termoionico, come si vedrà più innanzi.

Un altro fenomeno collegato a quello termoionico è la conducibilità elettrica delle fiamme. Come un elettroscopio carico si scarica rapidamente avvicinandogli un pezzo di metallo rovente per effetto degli elettroni emessi da questo, che ionizzano l'aria, così si scarica anche avvicinandogli una fiamma. Avviene che alcune molecole contenute nella fiamma perdono un elettrone, diventando ioni positivi; mentre gli elettroni distaccati si uniscono a una o più molecole neutre trasformandole in ioni negativi.

Il *fenomeno fotoelettrico* ha pure forte analogia col precedente; consiste in ciò che certi metalli colpiti dalla luce o anche da radiazioni invisibili — ultrarosse o ultraviolette (197) — emettono elettroni. La scoperta è stata fatta casualmente dal te-

desco Hertz (1887) e in seguito gli studi di una lunga schiera di eminenti fisici, tra cui va annoverato il nostro Righi, portarono alla costruzione della famosa *cellula fotoelettrica*.

Una disposizione, che realizzò in embrione la prima cella è dovuta allo Stoletow (1888) (fig. 440). *A* è una lastra di zinco unita, attraverso a un galvanometro *G*, col polo negativo di una batteria di pile ad alto potenziale; *B* è una rete di filo di platino connessa al polo positivo. In condizioni normali lo spazio fra *A* e *B* ha una resistenza così alta che nessuna corrente fluisce; quando però si mette una sorgente luminosa in *S*, la luce che attraversa le maglie della rete colpisce lo zinco obbligandolo ad abbandonare degli elettroni che migrano dallo zinco alla rete attratti da questa che è positiva: il galvanometro accusa una corrente. Usando lo zinco, il fenomeno è prodotto solo dai raggi ultravioletti.

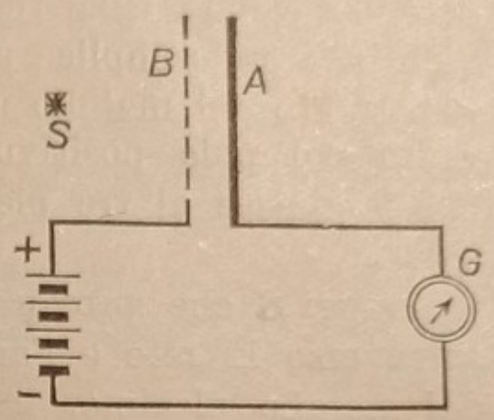


Fig. 440.

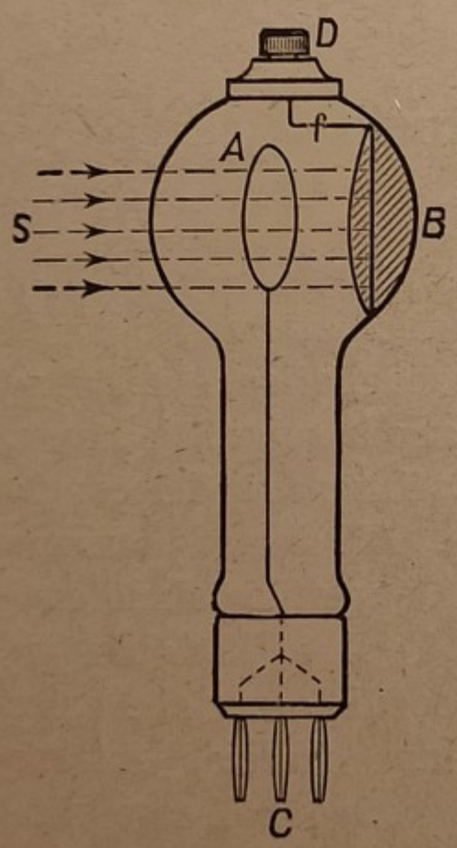


Fig. 441.

Più tardi Elster e Geitel sostituirono allo zinco i metalli alcalini e chiusero il metallo dentro un'ampolla vuota d'aria cosicchè il fenomeno avveniva anche per l'azione della luce e delle radiazioni citrarosse.

La ragione per cui certi metalli, quali lo zinco e i metalli alcalini hanno la facilità di abbandonare elettroni è detta nel paragrafo 240 che espone la teoria elettronica.

Nelle fotocelle attuali il metallo sensibile — potassio, sodio, litio, ecc. — è depositato in strato sottile *B* sulla parete interna di una bolla di vetro la quale può essere o vuota o piena di gas a seconda dei diversi usi della cella (fig. 441). Il metall

funziona da catodo, essendo, mediante un filo *f* unito attraverso il morsetto *D* al polo negativo di una batteria, ad alto potenziale. Una rete metallica, che può anche essere ridotta a un semplice anello *A*, si trova nella bolla davanti allo strato del metallo attivo e funziona da anodo, essendo unita col polo positivo della batteria attraverso a un filo che la unisce ai tre piedini *C*, innestati in uno speciale supporto.

I raggi *S* che provocano il fenomeno entrano nella bolla attraverso la rete e l'anello e colpiscono la superficie attiva del metallo alcalino.

Le fotocelle sono oggi largamente usate per molte applicazioni, la più importante delle quali è la *televisione*, che certo fra non molto ci farà assistere a meravigliosi spettacoli.

Induzione elettromagnetica.

288. Estensione del concetto di flusso di forza. — Nel § 213 è stato detto che il flusso di forza magnetica attraverso a una superficie qualunque, posta in un campo magnetico, è misurato dal numero di linee di forza che attraversano la superficie stessa, e che tale flusso dipende oltre che dalla intensità del campo anche dall'orientazione della superficie. Al flusso possiamo anche attribuire un segno: le faccie della superficie siano contrassegnate con due lettere, ad esempio, *A* e *B*, e allora converremo di ritenere il flusso *positivo* se le linee di forza, che come è noto hanno un senso definito da una freccia, entrano dalla faccia *A* ed escono dalla *B*, e negativo nel caso contrario.

Ora dobbiamo estendere il concetto di flusso di forza per chiarire a dovere i fenomeni d'induzione elettromagnetica che sono oggetto di questo capitolo. Abbiasi un filo metallico formante un circuito chiuso: diremo *flusso di forza concatenato* col circuito il flusso di forza che attraversa la superficie racchiusa dal conduttore.

289. Legge fondamentale dell'induzione elettromagnetica. — I fenomeni dell'induzione elettromagnetica, scoperti da Faraday nel 1831, obbediscono alla seguente legge fondamentale, che chiameremo *1ª legge dell'induzione elettromagnetica:*

In un circuito chiuso si desta una corrente, detta corrente indotta, quando per una causa qualunque, detta causa induttrice, avviene una variazione di flusso concatenato col circuito stesso, e la corrente indotta dura quanto dura la variazione del flusso.

Per brevità non descriviamo le classiche esperienze di Faraday, ma ci limitiamo ad esaminarne alcune altre le quali possono darci una più immediata spiegazione di fenomeni che acquistano speciale importanza in molte applicazioni.

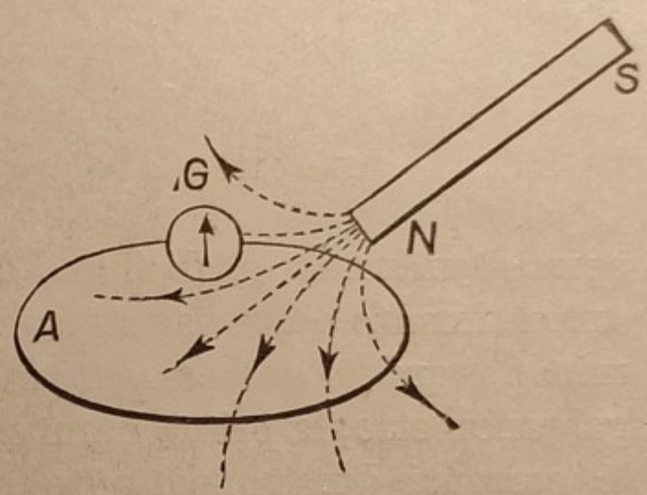


Fig. 442.

Sia una spira metallica A nella quale è inserito un galvanometro G (fig. 442). Nella spira evidentemente non circola corrente e il galvanometro rimane a zero. Avviciniamo o allontaniamo alla spira una calamita o moviamola in qualsiasi modo: il galvanometro indica subito una corrente che cessa non appena cessa il movimento della calamita. Precisamente si rileva che *avvicinando* un polo della calamita alla spira il galvanometro accusa una corrente in un *certo senso*, e *allontanando* il polo stesso, si rileva una corrente in *senso opposto* alla prima. Le correnti destate nella spira in tal modo si dicono correnti *indotte* e sono evidentemente prodotte da *variazioni del flusso* concatenato con la spira. Infatti avvicinando il polo N della calamita, le linee di forza uscenti da quel polo, che nella figura son segnate da linee punteggiate, passano in maggior numero attraverso la spira, e allontanando il polo stesso il loro numero diminuisce. E così quel numero è variabile movendo comunque il polo della calamita, che chiameremo *polo induttore*. Muovendo la calamita avvengono insomma nella spira delle varia-

zioni di flusso, condizione imposta dalla legge di Faraday per avere il fenomeno dell'induzione.

Facciamo ancora l'esperienza indicata dalla figura 443. Si abbia una spira A con un galvanometro G, formante il circuito *indotto* e una spira B *induttrice*, che comprende una pila P e un interruttore T. Se si chiude l'interruttore T nella spira B passa una corrente che genera un campo magnetico (276) le cui linee di forza attraversano la spira A; se poi si apre l'interruttore cessa il campo prodotto da B quindi nel primo caso si ha nella spira A un aumento di flusso e all'apertura dell'interruttore un annullamento del flusso stesso. Queste variazioni di flusso determinano quindi due correnti indotte nella spira A avvertite dal galvanometro, la prima in un senso, l'altra in senso opposto; ma le correnti durano soltanto per il piccolo tempo richiesto per chiudere o per aprire l'interruttore. Finchè questo resta chiuso o aperto nessuna corrente circola in A, non manifestandosi in essa alcuna variazione di flusso.

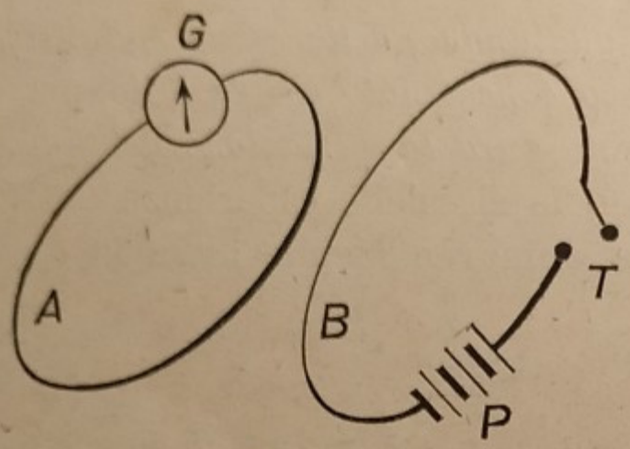


Fig. 443.

È poi logico che nella spira A si devono produrre delle correnti indotte, anche se lasciando chiuso l'interruttore della spira B, la quale allora è percorsa da una corrente costante, la si avvicina o la si allontana dalla spira A. Perchè in tal modo in questa spira avvengono le stesse variazioni di flusso che avvenivano lasciando ferme le due spire, chiudendo o aprendo il circuito B.

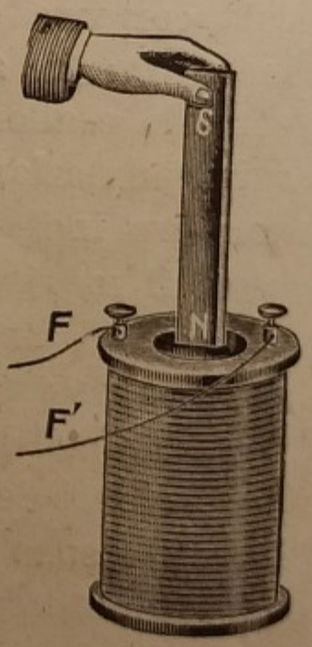


Fig. 444.

Le esperienze che seguono, sostanzialmente identiche a quelle descritte, ci permettono di ottenere fenomeni di induzione più cospicui. L'esperienza illustrata nella figura 444 si eseguisce ricorrendo a un rocchetto cavo sul quale è avvolto in molte spire un filo di rame isolato i cui capi F e F' sono chiusi

sopra un galvanometro. Se si immerge o si estrae un polo di una calamita nel rocchetto il galvanometro rivela delle correnti indotte.

Con la disposizione della figura 445 si eseguiscono le esperienze illustrate nella figura 443. Si hanno due rocchetti; l'induttore chiuso in circuito con una pila, l'indotto più grande chiuso sopra un galvanometro. Immergendo o estraendo il rocchetto induttore nella cavità dell'indotto si hanno ancora in questo le correnti d'induzione, che si ottengono anche lasciando fermi i due rocchetti l'uno dentro l'altro e agendo sul circuito induttore con un interruttore che nella figura non è disegnato.

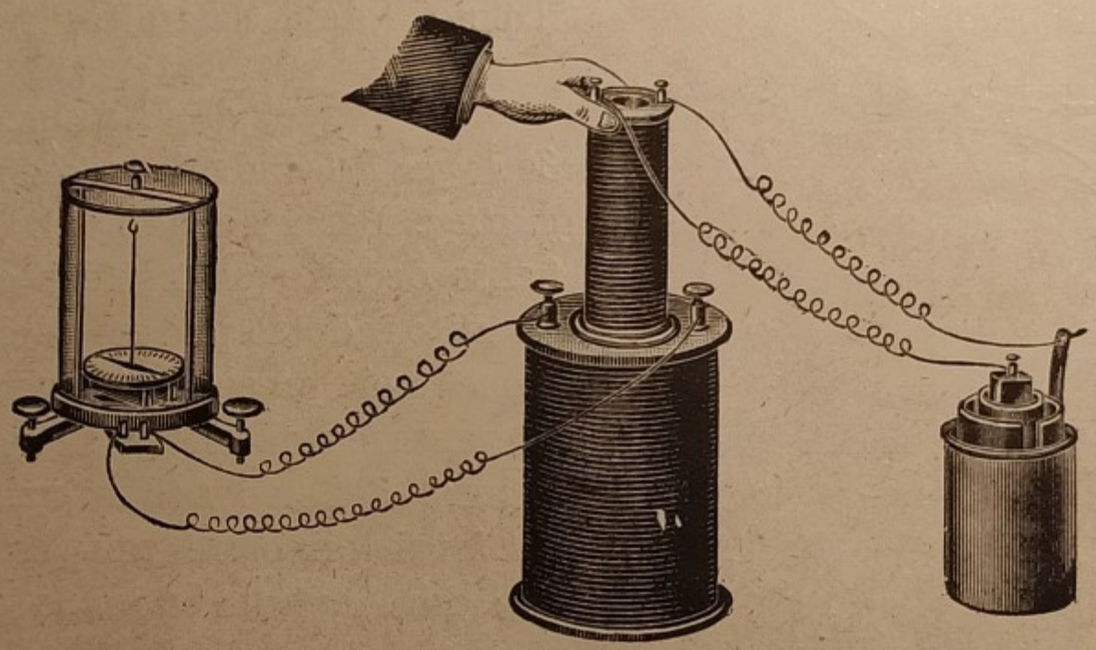


Fig. 445.

290. Legge di Lenz. — Questa legge — *2ª legge dell'induzione* — che ha un'importanza esclusivamente mnemonica, com'era della regola della mano destra, serve appunto per prevedere il senso della corrente indotta, indipendentemente dal modo della sua produzione. Essa ci dice che *la corrente indotta ha tal senso che tende ad opporsi alla causa che la produce.*

Verifichiamola prendendo in considerazione la prima esperienza di induzione del paragrafo precedente. Avviciniamo alla spira, movendolo da X verso Y, il polo N di una calamita (fig. 446); qual'è il senso della corrente indotta che si genera nella spira? Occorre ricordare che una spira percorsa da una corrente è assimilabile ad una lamina magnetica (276) la cui faccia nord sta dalla parte dell'osservatore che vede la corrente circolare

nel senso contrario alle lancette dell'orologio. Dunque per la legge di Lenz, la corrente indotta nella spira A deve girare in tal senso da far diventare la faccia superiore della spira un polo nord, perchè solo allora essa tenderà ad *allontanare* il polo induttore nord della calamita il cui *avvicinamento* è stato causa della corrente indotta. La corrente dovrà dunque percorrere la spira nel senso della freccia. Se si allontana il polo N della calamita la corrente indotta dovrà percorrere la spira in senso opposto, nel qual senso dovrà anche percorrerla se si avvicina alla spira il polo S della calamita.

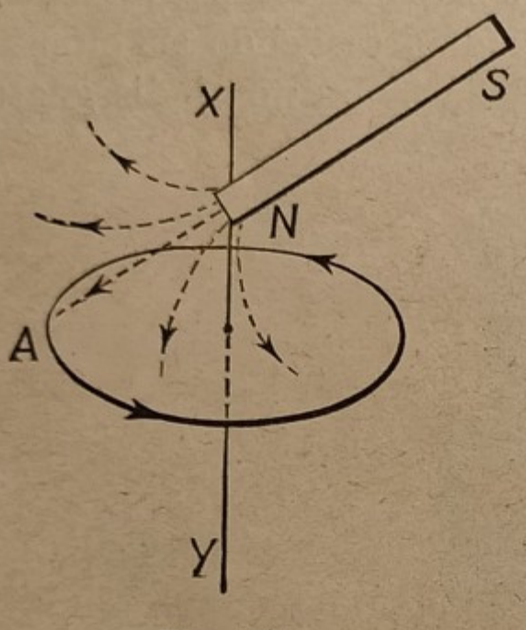


Fig. 446.

291. Legge di Neumann, o *3ª legge dell'induzione elettromagnetica.* Per intenderne il significato occorre premettere che il circuito indotto può essere chiuso, come nei precedenti esempi, o presentare una interruzione. Se è chiuso, l'effetto dell'induzione è di farvi circolare una corrente che dura quanto dura la variazione del flusso induttore. La intensità media i_m di tale corrente obbedisce alla 2ª legge di Ohm (265), cioè:

$$i_m = \frac{e_m}{R}$$

essendo R la resistenza del circuito indotto. La grandezza e_m definita da questa formula è detta *forza elettromotrice media indotta.*

Se il circuito invece è aperto, non può circolarvi corrente, e l'effetto dell'induzione è il destarsi ai margini dell'interruzione di una certa d. d. p., che in certi casi può anche raggiungere valori tanto elevati da produrre una scintilla fra l'interruzione. Tale d. d. p. è anche detta forza elettromotrice indotta.

Or la *legge di Neumann* dichiara che in ogni caso la *forza elettromotrice indotta media è proporzionale alla variazione del flusso che la produce e inversamente proporzionale alla durata di tale variazione.*

Per conseguenza la forza elettromotrice è zero se il flusso rimane costante ed è tanto maggiore quanto più grande è la variazione del flusso induttore e quanto più piccola è la durata di questa variazione. Perciò volendo ottenere delle forze elettromotrici indotte molto elevate occorre produrre *forti* e *rapide* variazioni di flusso.

292. Rocchetto di Ruhmkorff. — Questo apparecchio serve per ottenere delle correnti indotte ad alto potenziale, utilizzando le variazioni di flusso operate da una elettrocalamita. La sua struttura non differisce sostanzialmente dall'apparecchio della figura 445, che ci ha servito per le esperienze sulle correnti indotte.

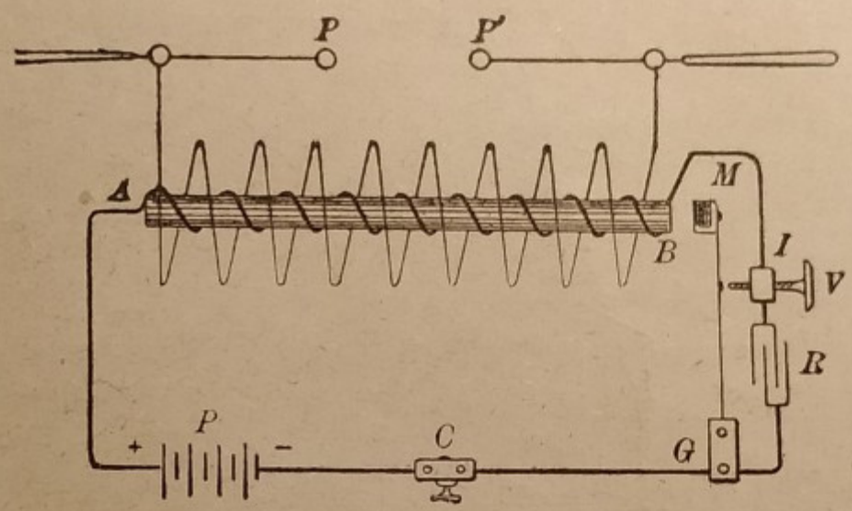


Fig. 447.

Nel rocchetto di Ruhmkorff, ridotto a figura schematica, (fig. 447), troviamo un nucleo formato di un fascio cilindrico di fili di ferro dolce AB, attorno al quale è avvolto solo in due o tre strati un filo di rame isolato del diametro da 1 a 2 millimetri.

Questo filo costituisce l'*induttore* o il *primario* del rocchetto ed ha un capo unito ad uno dei poli di una pila P, e l'altro unito ad una vite metallica V. Il secondo polo della pila è unito col *martello* M formato di un cilindretto di ferro dolce, che sta di fronte ad un estremo del nucleo, sostenuto da una molla che è a contatto della vite quando l'apparecchio non funziona. Martello e vite costituiscono il così detto *interruttore a martello*, che però è usato solo nei piccoli rocchetti. Al disopra del primario, è avvolto in molti strati un lunghissimo e sottilissimo filo di rame isolato, costituente l'*indotto* o *secondario* che mette capo allo spinterometro PP' (284). L'interruttore, funzionante nè più nè meno come il campanello

elettrico (307), determina delle rapide chiusure e aperture del circuito primario, cioè delle rapide e forti variazioni di flusso nel secondario, ai capi del quale vengono così a determinarsi delle d. d. p. più o meno elevate. E poichè la variazione del flusso induttore è assai più rapida all'apertura che alla chiusura del primario, la d. d. p. indotta sulle sferette dello spinterometro è assai *maggiore* all'apertura che alla chiusura, e per conseguenza la corrente indotta di apertura può attraversare lo

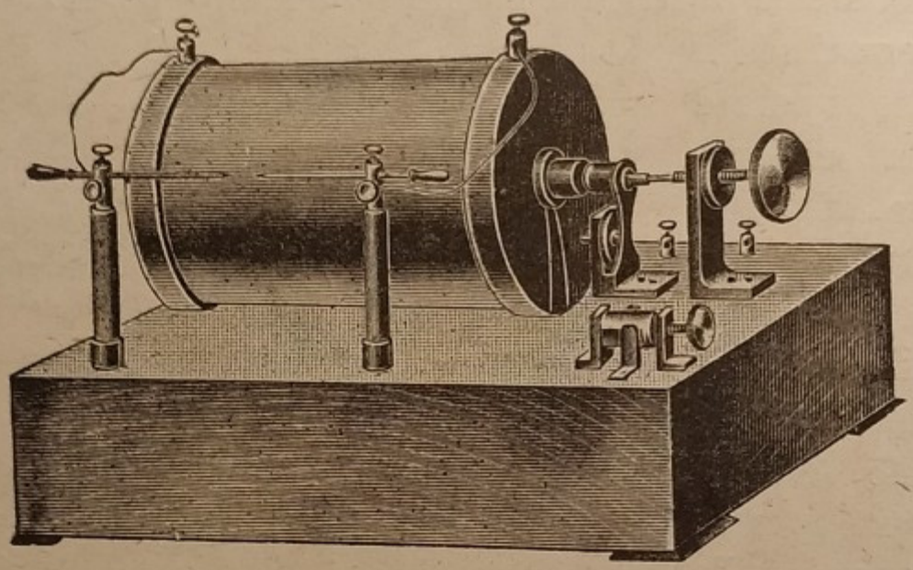


Fig. 448.

strato d'aria fra le due sferette sotto forma di scintilla, mentre la corrente indotta di chiusura resta soppressa.

Il rocchetto di Ruhmkorff può darci delle brevi correnti ad alto potenziale, tutte dirette in uno stesso senso, nel qual caso il rocchetto ha due poli, *positivo* e *negativo*, come una macchina elettrica.

La figura 448 mostra nel suo insieme un piccolo rocchetto di Ruhmkorff coll'interruttore a martello. Ma i rocchetti medi e grandi sono forniti di altri tipi d'interruttori.

I rocchetti di medie dimensioni hanno spesso un interruttore che differisce da quello a martello descritto per il fatto che l'interruzione della corrente primaria avviene fra una punta metallica e il mercurio contenuto in un piccolo bicchiere coperto con uno spesso strato di alcool o petrolio. La scintilla viene in tal modo rapidamente smorzata a vantaggio della f. e. m. indotta di apertura.

I grandi rocchetti (fig. 449) non portano un interruttore che forma parte integrante con essi; in questi, tale organo è separato, e le interruzioni, che anche qui avvengono tra il mercurio e una punta mobile, sono provocate da un motorino che imprime alla punta un rapido motto di salita e discesa (fig. 450).

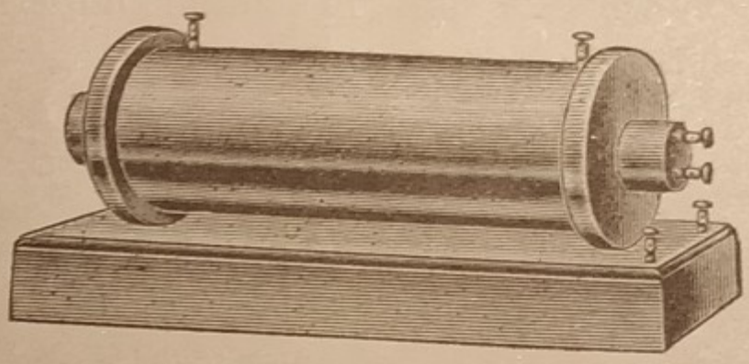


Fig. 449.

Largamente usato è oggi anche l'*interruttore elettrolitico* o di *Wehnelt* (fig. 451), col quale si possono ottenere fino a 2000 interruzioni al secondo. Esso è una specie di voltametro ad

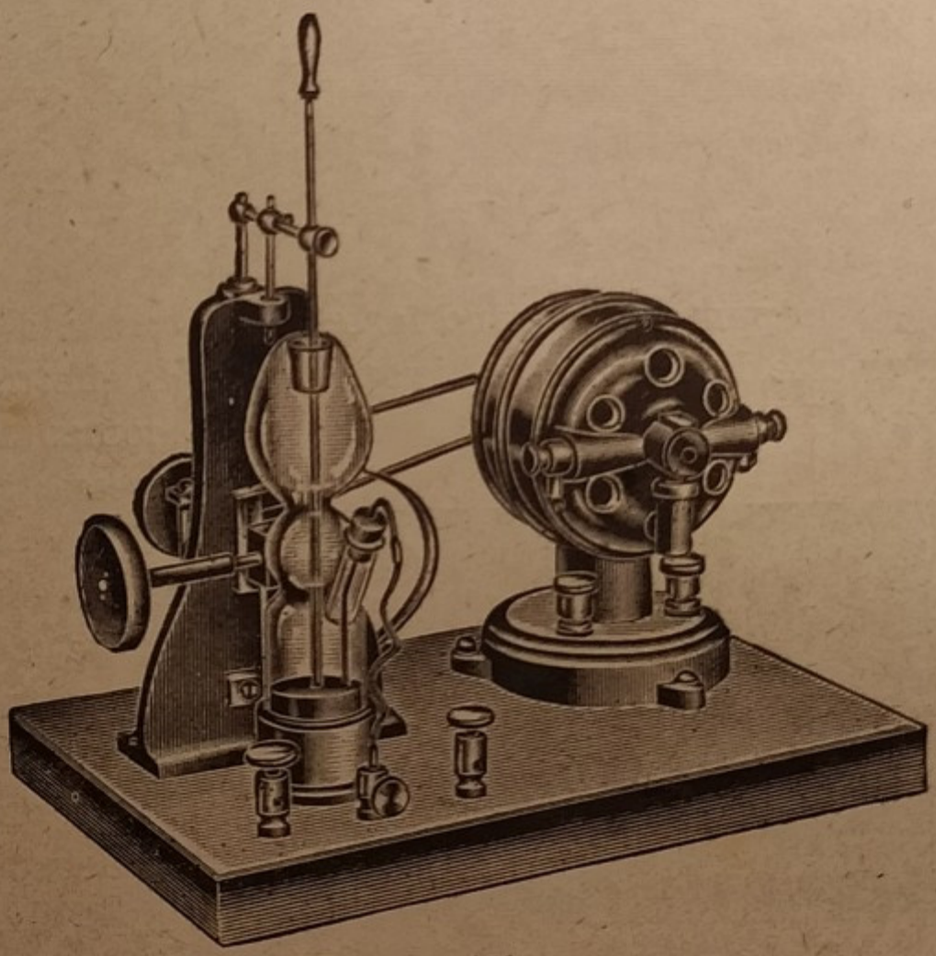


Fig. 450.

acqua acidulata, coll'anodo formato di un bastoncino di platino, sporgente per qualche millimetro da un tubo di porcellana, e col catodo formato di una larga lamina di piombo. Per deboli correnti, l'apparecchio si comporta come un comune volta-

metro, ma quando l'intensità aumenta, chiudendolo in circuito con una sorgente — ad esempio una batteria di accumulatori — da 30 a 120 volta, lo sviluppo d'ossigeno diviene intermittente.

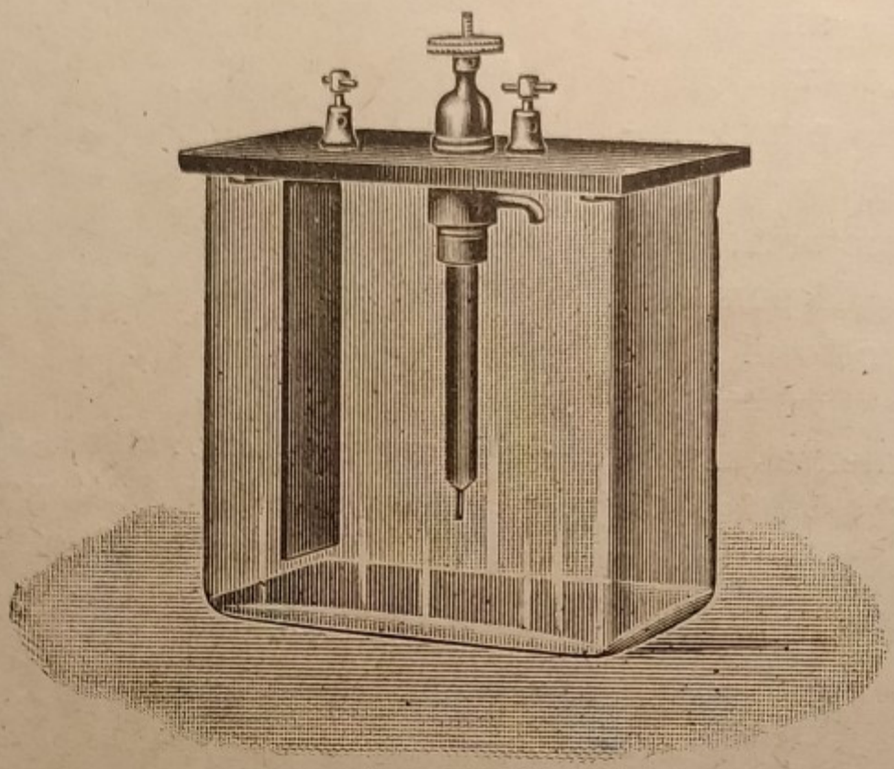


Fig. 451.

Oltre a ciò la punta di platino fortemente scaldata dalla corrente, si riveste di una guaina di vapore che per effetto del calore si dissocia. La corrente resta in tal modo momentaneamente soppressa; ma subito la bolla si stacca e il liquido venendo nuovamente a contatto colla punta il fenomeno si ripete.

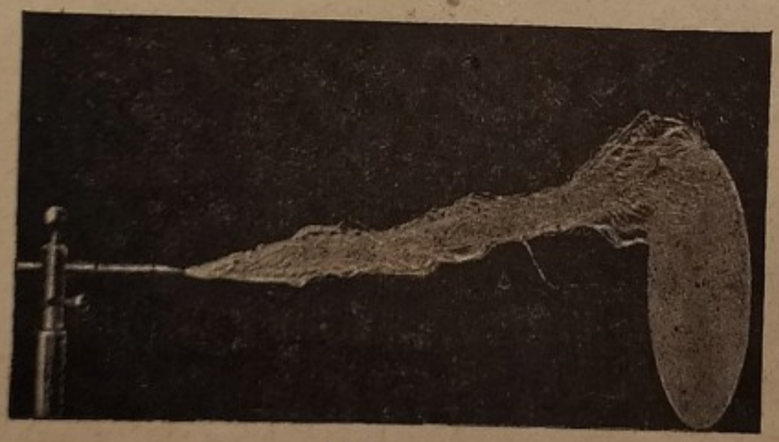


Fig. 452.

Usando un rocchetto di dimensioni convenienti e l'interruttore elettrolitico, la scarica nello spinterometro, formato di una punta e di un disco, acquista l'aspetto di una fiamma o di un fascio di molte scintille, che appariscono all'occhio simultaneamente per la persistenza delle immagini sulla retina (fig. 452).

Il rocchetto di Ruhmkorff è un apparecchio che funziona regolarmente in tutte le condizioni atmosferiche e può in tantissimi casi sostituire con grande vantaggio le macchine elettrostatiche, sempre più o meno capricciose.

Con rocchetti di dimensioni convenienti si possono ottenere scintille nell'aria di lunghezza anche superiore a 1 metro.

Il rocchetto è usato nell'analisi spettroscopica (193), per infiammare le mine o le torpedini a distanza, per ottenere la scarica dentro gas rarefatti, e ancora per effetti fisiologici e terapeutici.

293. Autoinduzione. — Le leggi dell'induzione sono generali. Per ora noi le abbiamo verificate mediante variazioni di flusso prodotte da cause esterne al circuito indotto, ma valgono anche quando le variazioni di flusso sono prodotte dalla corrente che percorre il circuito medesimo.

Ad esempio, se si ha un certo circuito A, di cui fa parte un interruttore e una pila, chiudendo l'interruttore, non appena la corrente comincia a passare, anche il flusso concatenato col circuito va aumentando, e si desta quindi nel circuito una corrente indotta, che per la legge di Lenz è *inversa* alla corrente principale, e ritarda quindi lo stabilirsi di questa. Vale a dire, per effetto della corrente indotta, la corrente principale non raggiunge immediatamente il suo valore normale, che è fissato dalla legge di Ohm, ma lo raggiunge in un tempo più o meno grande. La corrente indotta che si genera in tal modo si dice *extracorrente di chiusura.*

Se il circuito principale viene in seguito aperto, per la rapida diminuzione di flusso che ne consegue, ha origine nel circuito stesso una corrente indotta *diretta*, avente cioè lo stesso senso della corrente principale. Questa corrente è detta *extracorrente di apertura.* In questo caso però nei punti dove avviene l'interruzione, per effetto della f. e. m. indotta piuttosto elevata, si determina una d. d. p. che stabilisce una specie di arco luminoso, ossia una scintilla. Ne consegue che la corrente non si annulla bruscamente, ma decresce più o meno rapidamente. Se invece di aprire il circuito, si sopprime la pila facendo un corto circuito fra i suoi poli, cioè congiungendo questi con un pezzo di filo di rame di resistenza trascurabile, la corrente

continua per qualche tempo diminuendo più o meno lentamente di intensità.

Le extracorrenti prendono anche il nome di correnti di *autoinduzione*, e i loro effetti, specialmente quelli della extracorrente di apertura, possono manifestarsi con grande intensità. Nei grandi impianti elettrici, per esempio, gli interruttori che servono a interrompere le forti correnti di una centrale elettrica, sono muniti di speciali dispositivi per evitare i danni che sarebbero prodotti dalle enormi scintille che si destano all'apertura dei circuiti.

Gli effetti dell'auto induzione sono più rilevanti quando il circuito è formato di molte spire, avvolto sopra un nucleo di ferro dolce, perchè in tal caso, data la grande permeabilità del ferro, sono più forti le variazioni del flusso induttore. Si costruiscono con tal criterio i *rocchetti di autoinduzione* che nella tecnica delle correnti alternate hanno un'importanza grandissima.

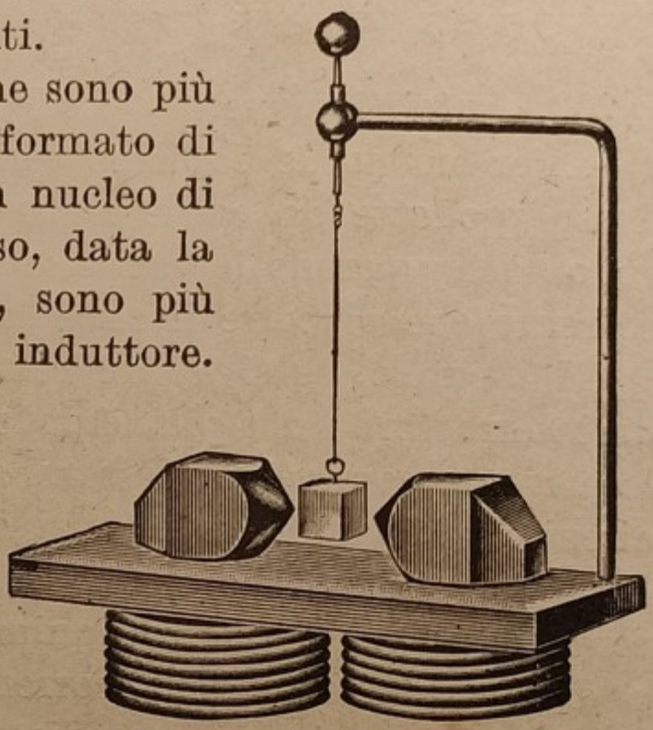


Fig. 453.

294. Correnti di Foucault. — Quando una massa conduttrice, per esempio di rame o di ferro, si sposta in un campo magnetico, si destano nel suo interno per induzione delle correnti chiuse che si chiamano *correnti di Foucault*. Queste correnti si sviluppano in piani perpendicolari alla direzione del campo, e obbedendo alla legge di Lenz tendono a opporsi al movimento che le ha destate In conseguenza per mantenere la massa in moto occorre spendere del lavoro che si trasforma in calore nella massa stessa.

L'esistenza delle correnti di Foucault può mettersi in evidenza in vari modi, e in un modo assai semplice come indica la figura 453.

Un cubo di rame viene sospeso fra i poli di una elettrocalamita e si torce il filo di sospensione. Abbandonandolo a

se stesso prende un rapido movimento di rotazione, ma si arresta subito se si eccita l'elettrocalamita.

Le correnti di Foucault sono in molti casi pratici nocive, assorbendo inutilmente una certa quantità di energia, e perciò sono anche state chiamate *correnti parassite*. Per tal ragione si tenta di attenuarle più che è possibile, e ciò si ottiene preparando le masse conduttrici in fogli separati l'uno dall'altro da un sottile strato isolante, disposti in modo che il loro piano sia parallelo alla direzione del campo. In tali condizioni le correnti di Foucault non possono prodursi che nello spessore delle lamine e riescono notevolmente ridotte, con che rimane anche ridotta la perdita di energia.

Correnti alternate.

295. Corrente alternata semplice o monofàse. — Finora abbiamo sempre espressamente o tacitamente ammesso di

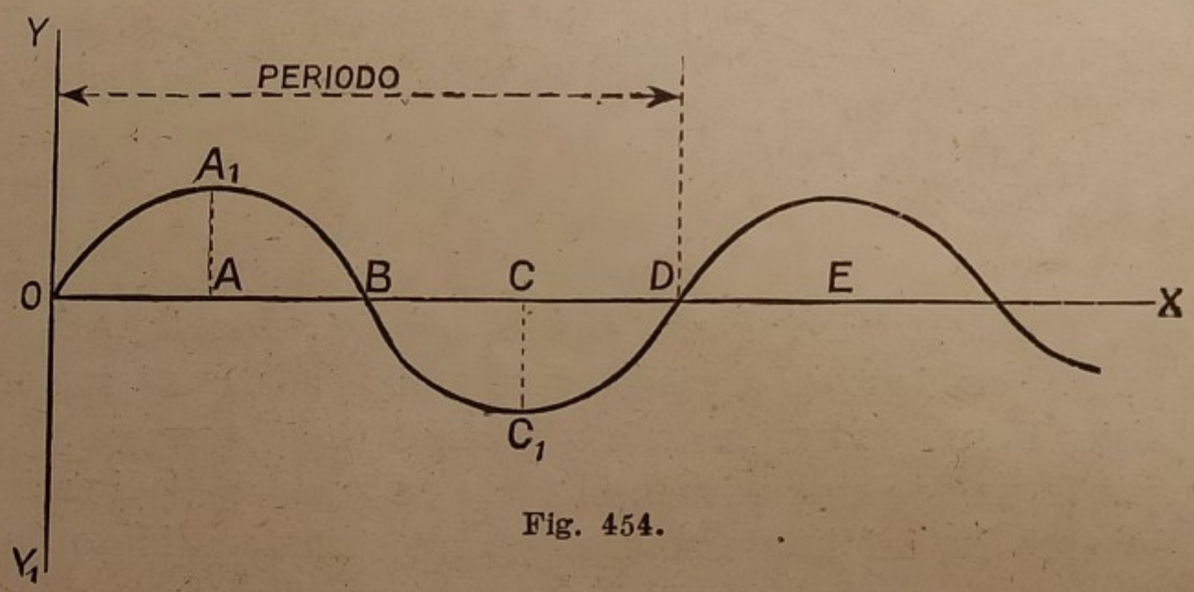


Fig. 454.

usare come generatori di corrente le pile o gli accumulatori, apparecchi che dànno una *corrente continua*, ossia una corrente che percorre il circuito sempre in un senso.

Nelle applicazioni moderne della elettricità invece si fa quasi sempre uso di correnti alternate. *La corrente alternata percorre il circuito alternativamente nei due versi opposti.* La sua intensità varia col tempo con una legge che si può rappresentare con la curva della figura 454. L'arco OA_1B rappresenta la variazione della intensità della corrente nel semiperiodo OB,

nel quale la corrente circola in un certo senso e l'arco BC_1D la variazione nel semiperiodo successivo BD, nel quale la corrente cammina in senso contrario e così di seguito. Il periodo è nella figura rappresentato da OD. La frequenza della corrente alternata è, come in Acustica, il numero dei periodi contenuti in un secondo. Nelle correnti industriali si ha una frequenza quasi sempre compresa fra 40 e 50 periodi al secondo.

296. Corrente trifàse. — La corrente ora esaminata è detta anche *monofàse*, per distinguerla dalle correnti *polifàsi*, delle quali è oggi particolarmente utilizzata la *trifàse*.

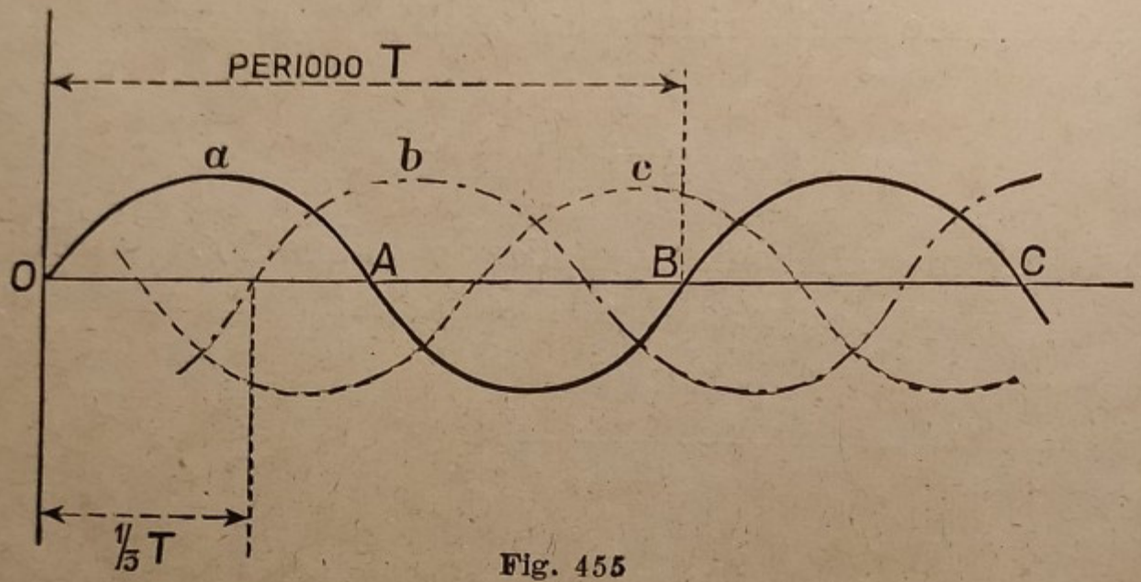


Fig. 455

La *corrente trifàse, è un sistema di tre correnti monofàsi spostate di un terzo di periodo;* vale a dire che la 2ª corrente acquista il suo valore *massimo positivo*, cioè percorrendo il circuito in un determinato senso, con un ritardo di ⅓ di periodo dall'istante in cui lo stesso massimo è stato raggiunto dalla 1ª corrente; e analogamente la 3ª è spostata rispetto alla 2ª di ⅓ di periodo, per conseguenza la 1ª è spostata anche di ⅓ di periodo rispetto alla 3ª. Perciò il sistema può essere rappresentato dalla figura 455 nella quale le tre correnti sono rappresentate rispettivamente dalle curve *abc*.

Le tre correnti che hanno i caratteri esposti, sono generate da un'unica macchina detta *alternatore trifàse*, che verrà in seguito brevemente esaminata. Tale alternatore presenta tre poli, rappresentati nella figura 456 dai cerchietti *Ma*, *Mb*, *Mc*, ai quali sono uniti *tre* conduttori — i fili di linea — C_1, C_2, C_3,

che alimentano *tre circuiti*, formati il 1° R_1 dai conduttori C_1 C_2 che alimenta supponiamo le lampade L_1, il 2° R_2 è formato dia

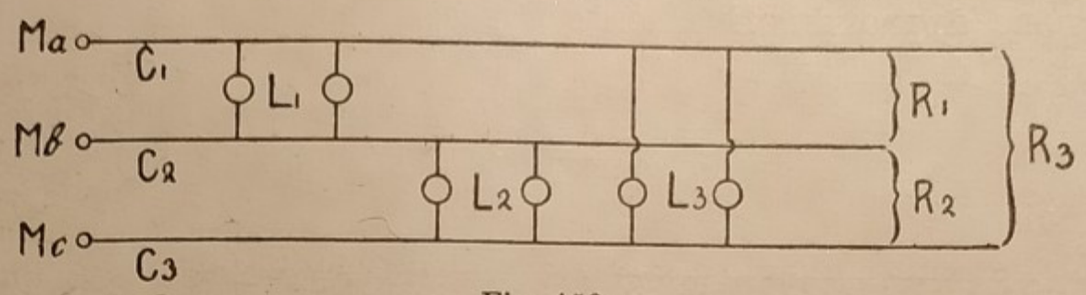


Fig. 456.

conduttori C_2 C_3 ed alimenta le lampade L_2; il 3° R_3 coi conduttori C_2 C_3 alimenta le lampade L_3.

La corrente trifàse è massimamente utilizzata nelle moderne applicazioni per i suoi pregi sopra gli altri sistemi.

Macchine generatrici di corrente.

È intuitivo che l'enorme quantità di energia elettrica oggi adoperata non possa ottenersi mediante le pile.

La corrente industriale, per luce, forza motrice, effetti chimici, ecc., viene ottenuta economicamente con speciali macchine a spese del lavoro meccanico fornito da un motore.

Tali macchine si comprendono sotto il nome di *dinamo elettriche*, sebbene nella tecnica si chiamino semplicemente *dinamo* le macchine produttrici di corrente continua, e *alternatori* quelle che dànno corrente alternata.

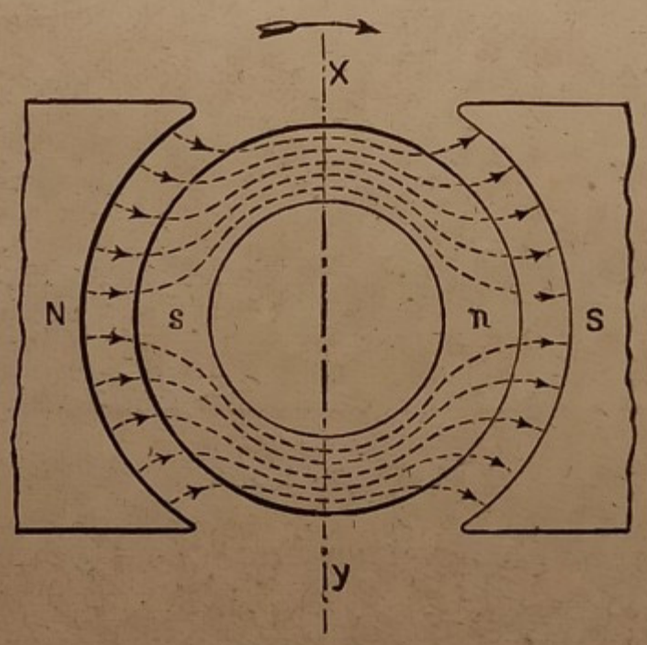


Fig. 457.

297. Dinamo elettriche. — Abbiasi un campo magnetico prodotto dalle espansioni polari N ed S di una calamita o elettrocalamita (fig. 457) e tra le espansioni si metta un anello

di ferro dolce. Sappiamo che il ferro, in grazia alla sua permeabilità, raccoglie tutte le linee di forza del campo che così seguono approssimativamente il percorso segnato con le linee a tratti della figura.

Che l'anello resti fermo o ruoti è chiaro che le linee di forza conservano nello spazio occupato dall'anello una traiettoria invariabile.

Ora esaminiamo ciò che avviene in una spira che circonda l'anello e che è con esso solidale, mentre l'anello compie un giro

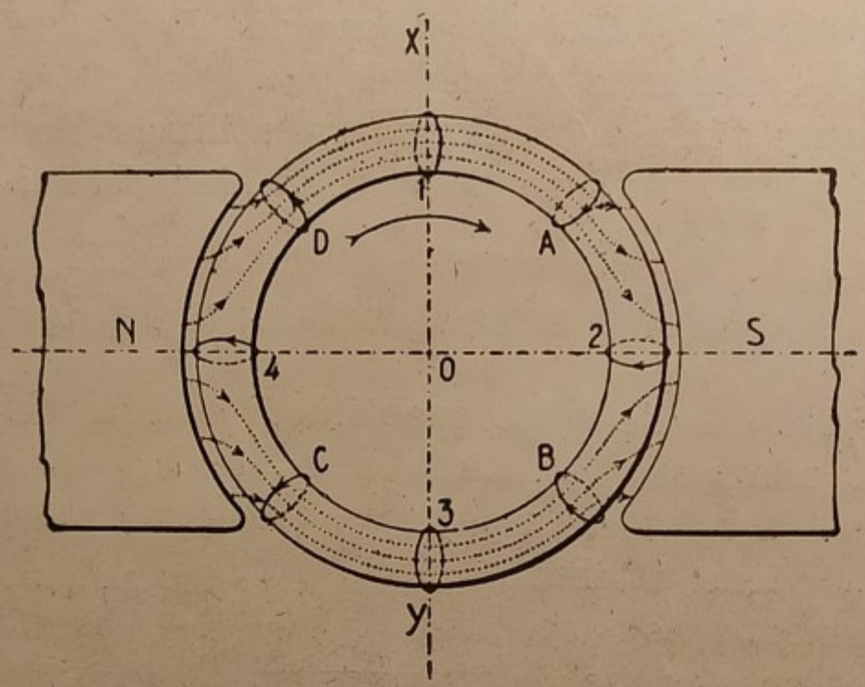


Fig. 458.

completo nel senso della freccia (fig. 458). Se si indica con Φ il flusso totale che va da N ad S, l'anello è attraversato da una parte e dall'altra della retta NS, da un flusso $\frac{\Phi}{2}$; sicchè quando la spira è nella posizione 1, il flusso che la attraversa ha il valor massimo, cioè $\frac{\Phi}{2}$. Mentre la spira passa da 1 a 2 il flusso *diminuisce* e diventa zero in 2.

Nel passaggio della spira da 2 a 3 il flusso che la attraversa *diminuisce* da zero a $-\frac{\Phi}{2}$; infatti nella posizione 3 le linee di forza, avuto riguardo alle due faccie della spira, la attraversano nel senso opposto della posizione 1.

La spira passa in seguito da 3 a 4, con che si ha un *aumento* di flusso che passa da $-\frac{\Phi}{2}$ a zero, e da 4 a 1 si ha un ulteriore *aumento di flusso* da zero a $\frac{\Phi}{2}$.

Le quattro variazioni di flusso che avvengono durante un giro nella spira vi destano delle correnti indotte che al lume della legge di Lenz (290) attraversano la spira in un certo senso per il suo passaggio da 1 a 3 e in senso opposto da 3 a 1.

La corrente nella spira cambia dunque segno due volte ad ogni giro completo e precisamente negli istanti in cui passa attraverso il piano XY, che perciò vien detto *piano di commutazione*.

Il sistema anello-spira esaminato costituisce uno schema di *indotto*.

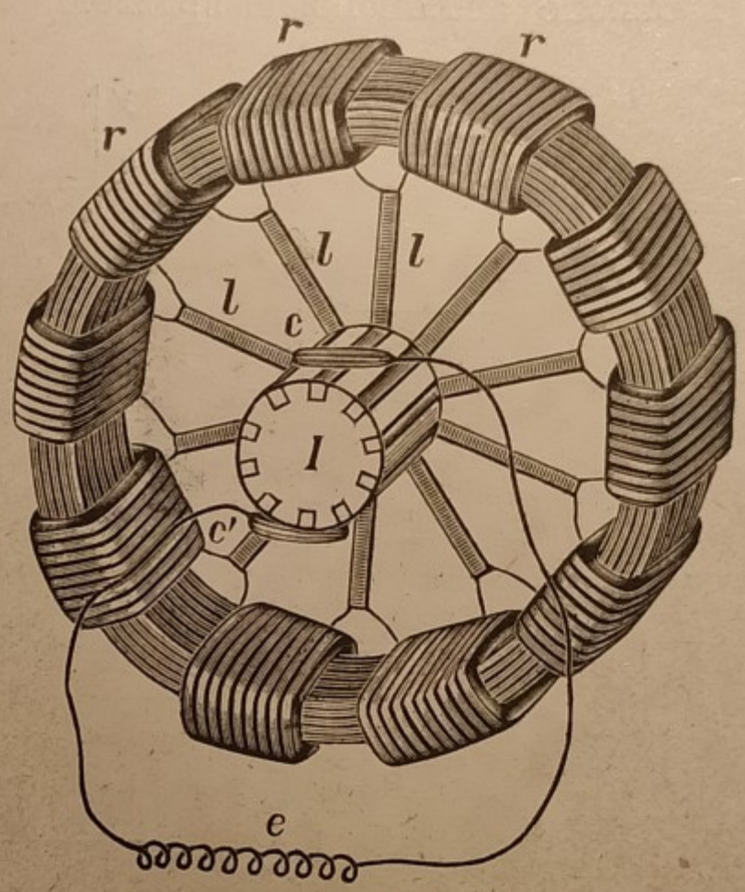


Fig. 459.

Per sfruttare le correnti indotte della spira il prof. Pacinotti di Pisa costruì (1863) il suo famoso anello e si ebbe così la prima macchina dinamo-elettrica.

Sopra l'anello di ferro il Pacinotti avvolse un filo di rame isolato formante diversi rocchetti r, r (fig. 459). Ogni rocchetto porta lo stesso numero di spire, il filo vi è avvolto nello stesso senso, e i diversi rocchetti sono uniti in serie, sicchè in totalità formano un circuito unico chiuso. I piani delle spire passano tutti per l'asse dell'anello e i tratti d'unione fra un rocchetto e quello successivo sono saldati ad altrettante sbarrette di rame l, l radiali. Queste sbarrette vengono separatamente riunite a lamine di rame isolate, disposte secondo le generatrici, sopra un cilindro coassiale all'anello. Tale cilindro I è detto *collettore*.

L'anello così preparato è girevole intorno ad un asse che è l'asse della cavità cilindrica praticata nei pezzi polari dell'induttore.

Sul collettore poggiano due pezzi di metallo o di carbone detti *spazzole AB* (fig. 460) che sono rispettivamente a contatto con due generatrici diametralmente opposte, che si trovano sul piano *XY* perpendicolare alla linea *NS*. Così durante la rotazione dell'anello, le spazzole, che rimangono fisse, fanno

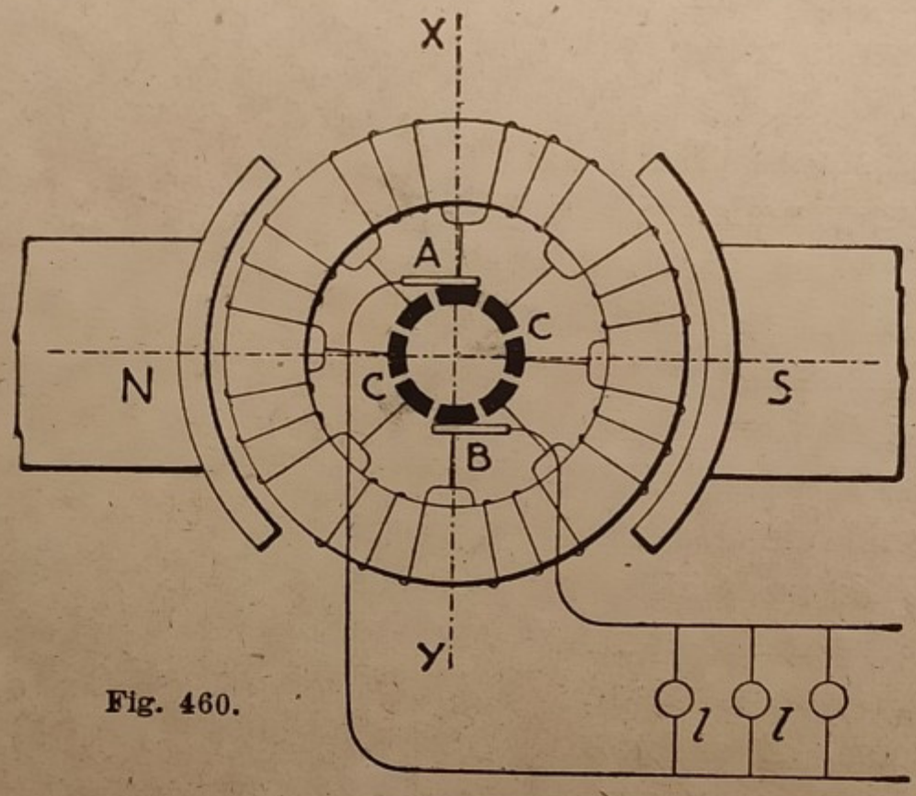


Fig. 460.

successivamente contatto con tutte le coppie di lamine del collettore diametralmente opposte. Dalle spazzole partono due fili destinati a portare la corrente generata dalla macchina agli apparecchi di utilizzazione: lampade, motori, ecc. *ll*.

Or avviene che il fenomeno che si compiva nell'unica spira della figura 458 si compie in maggior misura in ognuno dei rocchetti dell'anello in grazia delle numerose spire di cui ciascuno è fatto e tutti i rocchetti che ad un dato istante sono a destra del piano di commutazione *XY* sono percorsi da una corrente in un dato senso, per esempio, dall'alto in basso. I rocchetti che nello stesso istante sono a sinistra di *XY* sono percorsi da una corrente in senso contrario, cioè ancora dall'alto in basso. Per conseguenza la spazzola *A* presenta sempre un

potenziale maggiore della B e se le spazzole sono chiuse esternamente in circuito, in questo passa una corrente da A che funziona da polo positivo a B che funziona da polo negativo.

La corrente così ottenuta è praticamente continua.

298. Eccitazione nelle dinamo. — Per mantenere il campo induttore, senza del quale la dinamo non darebbe corrente, il procedimento più semplice sarebbe quello di impiegare delle calamite permanenti, ma queste dànno campi magnetici troppo deboli.

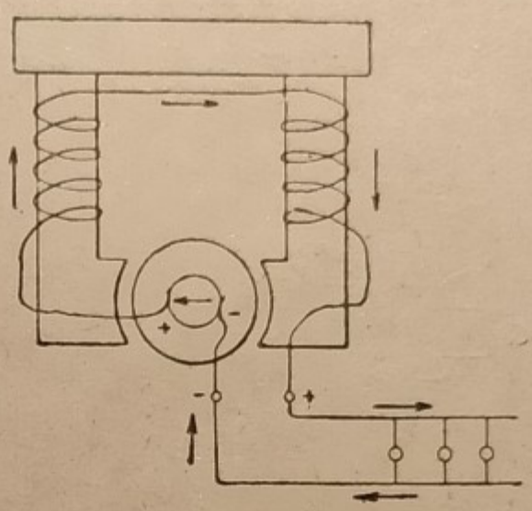


Fig. 461.

Nelle dinamo industriali il campo induttore è ottenuto con elettrocalamite che risultano attive impiegando la corrente stessa che produce la macchina, ricorrendo cioè all'*autoeccitazione*.

Il fatto si comprende se si ricorda che un pezzo di ferro dolce dopo la magnetizzazione conserva sempre del magnetismo residuo (210). Or supponiamo che l'indotto giri dentro le espansioni polari di una elettrocalamita, e le spazzole sieno messe in serie col circuito di eccitazione e con quello di utilizzazione. In tal modo si ha la *eccitazione in serie* (fig. 461). Non appena l'indotto si mette in moto, la debole corrente che per effetto del magnetismo residuo si genera, circola nel circuito induttore nel senso da esaltare il debole campo induttore iniziale, con che aumenta la f. e. m. indotta e quindi la corrente, di modo che in breve tempo, viene raggiunto lo stato di regime, ossia alle spazzole si desta la d. d. p. necessaria a mantenere nel circuito di utilizzazione la corrente voluta.

Esistono però altri tipi di eccitazione che per brevità omettiamo; in tutti i casi l'energia spesa nell'eccitazione è una frazione abbastanza piccola di quella generata dalla dinamo in modo che la parte maggiore è riservata ad alimentare gli apparecchi di utilizzazione.

299. Alternatore monofàse. — L'alternatore, come si è accennato, è una macchina generatrice di corrente alternata.

Uno schema di alternatore è rappresentato dalla figura 462, la quale va messa in relazione con la figura 458, che ha servito per illustrare la genesi della corrente in una spira fissata sopra un anello di ferro dolce girante in un campo magnetico. Nella figura 462 *ff* è l'anello, con l'asse di rotazione *aa*, *s* è la spira con una interruzione, i capi della quale mediante due fili sono stabilmente uniti a due piccoli cilindri di rame *cc'*, isolati fra loro e solidali con l'asse dell'anello. Due liste conduttrici *bb'* fisse — *spazzole* — poggiano sugli anelli di rame e vi strisciano sopra durante la rotazione. Le spazzole costituiscono i *poli* della macchina, e sono ordinariamente di carbone, tenute appoggiate per l'azione di una molla, contro gli anelli di rame formanti il *collettore*.

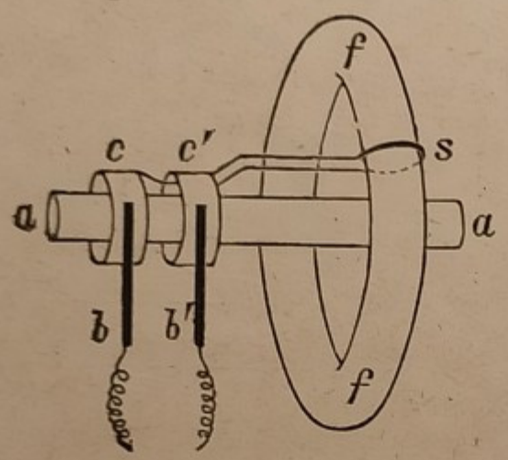


Fig. 462.

Pensiamo in un primo tempo che le spazzole siano isolate, e che l'anello giri nel campo magnetico induttore; il fenomeno dell'induzione attivo nella spira, desta ai capi di questa, cioè alle spazzole, una d. d. p. che cambia senso ad ogni mezzo giro dell'anello, e precisamente, come avveniva nello schema della dinamo a corrente continua, negli istanti in cui la spira, due volte per giro, attraversa il piano di commutazione. Alle spazzole dunque si ha una *d. d. p. alternata*. Se ora si congiungono le spazzole con un filo metallico, otteniamo nel circuito una *corrente alternata* e se del circuito fa parte, per esempio, una lampada elettrica, la corrente che la attraversa la renderà incandescente.

Il modello descritto rappresenta molto schematicamente un alternatore. Sopra l'anello di ferro di un alternatore industriale, invece di una sola spira, si ha un avvolgimento comprendente numerosissime spire, disposte in modo che i loro effetti si sommino. Inoltre l'anello che porta le spire indotte è il più delle volte fermo, e dentro di esso gira un altro anello con avvolgimento adatto a generare il campo induttore. Il principio del funzionamento resta tuttavia inalterato.

In ogni macchina, sia una dinamo sia un alternatore, l'energia elettrica è prodotta a spese dell'energia meccanica sviluppata dal motore necessario a mantenerli in moto. Prova ne è che lasciando le spazzole isolate, in modo che la macchina non dia corrente, per far girare la macchina *a vuoto*, come si dice, occorre spendere una limitatissima quantità di energia meccanica, quanta occorre per vincere gli attriti. Se invece le spazzole sono chiuse sopra un circuito utilizzatore, occorre una energia meccanica molto più grande necessaria a vincere le azioni elettromagnetiche che si destano fra l'induttore e l'indotto, azioni che per la legge di Lenz hanno verso tale da opporsi alla causa induttrice che produce la corrente d'induzione, cioè alla rotazione della macchina.

Nell'industria moderna quasi il 100 per 100 dell'energia elettrica adoperata è ottenuta con correnti alternate. Le dinamo hanno oggi applicazioni molto limitate.

300. L'alternatore trifàse. — Per intendere il funzionamento di un *alternatore trifàse* pensiamo che sull'anello di ferro della figura 462 del § precedente, siano fissate tre spire, anzichè una, a distanza angolare una dall'altra di ⅓ di giro e che i capi di ciascuna siano uniti a una coppia di anelli di rame, come quelli dell'alternatore semplice, e che per conseguenza si abbiano 3 coppie di spazzole. Ogni coppia è chiusa esternamente sopra un proprio circuito, dimodochè si hanno tre circuiti di utilizzazione.

In ciascun circuito si ha per conseguenza una corrente alternata semplice, ma le tre correnti sono, come si dice, *sfasate* di un terzo di periodo.

Per intenderci, nominiamo con 1, 2, 3 le tre spire dell'anello — la spira 1 precede le altre —; è evidente che gli istanti in cui le correnti acquistano nelle spire il valor massimo positivo, cioè in un determinato senso, non possono coincidere, essi si troveranno in ritardo della durata di ⅓ di giro ossia di ⅓ di periodo; si ha in sostanza una corrente trifàse di cui si è detto nel § 296.

Nel ragionamento fatto è supposto che l'alternatore trifàse debba avere il collettore formato con 3 coppie di anelli e 3 coppie

di spazzole, una coppia per ciascuna corrente; è però dimostrato che le tre correnti risultano inalterate, usando solo 3 anelli e 3 spazzole a cui sono uniti 3 capi delle spire indotte, uno per una, gli altri 3 capi risultanto semplicemente uniti fra di loro in un punto detto *neutro*.

L'alternatore trifase ha così tre morsetti o poli, *Ma*, *Mb*, *Mc*, (fig. 456) uniti ai fili di linea che alimentano i 3 circuiti di utilizzazione.

La corrente trifàse è oggi la più utilizzata, presentando sopra gli altri tipi dei grandissimi vantaggi che l'indole del nostro programma però non può spiegare.

Motori elettrici.

Sono macchine che hanno funzione inversa delle dinamo, e si distinguono in *motori a corrente continua* e *motori a corrente alternata*, detti anche *alternomotori*.

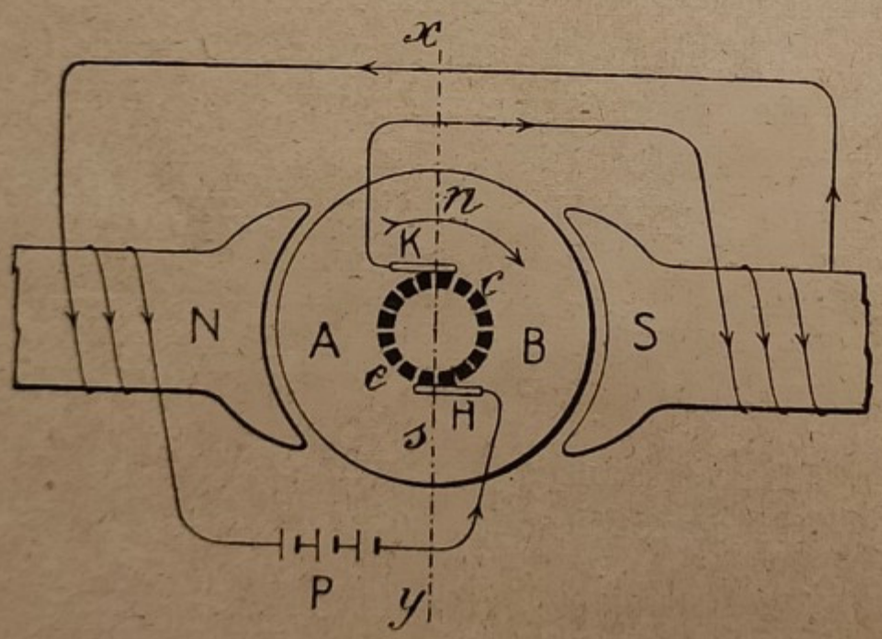


Fig. 463.

301. Motori a corrente continua. — La dinamo a corrente continua, già descritta, è un apparecchio perfettamente reversibile, cioè, facendovi arrivare alle spazzole un'adatta corrente continua, agisce da motore. Vediamo di spiegarcene il funzionamento riferendoci alla figura 463 che ripete nelle linee generali gli organi di una dinamo.

AB è l'indotto col collettore *cc*, *NS* le espansioni polari dell'induttore, dentro le quali l'indotto è girevole; *P* rappresenta la sorgente di corrente continua,

Questa corrente arrivando alla spazzola H, si divide in due correnti che percorrono i due gruppi di rocchetti che stanno dalle bande opposte del piano xy. La corrente ridiventa unica alla spazzola K e percorre l'avvolgimento induttore tornando all'altro polo della sorgente. In tal modo le espansioni polari NS restano permanentemente eccitate, e nel ferro dell'anello in causa della corrente che vi circola, si destano due poli contrari in corrispondenza del piano xy, per esempio, un polo nord in n e uno sud in s. Questi poli rimangono sempre sul piano xy anche se l'anello è in rotazione. Si manifestano quindi permanentemente quattro azioni tra le quattro coppie di poli contigui Nn, nS, Ss, sN, azioni concordi evidentemente e che nel caso della figura obbligano l'indotto a ruotare nel senso delle lancette dell'orologio.

Dal ragionamento fatto sopra apparisce chiaro che invertendo il senso della corrente che alimenta il motore, s'invertono ad un tempo e i poli dell'induttore e quelli dell'indotto, con che il senso della rotazione rimane immutato. Se si vuole il cambiamento di marcia, occorre invertire con un apposito dispositivo la corrente o solo nell'indotto o solo nell'induttore.

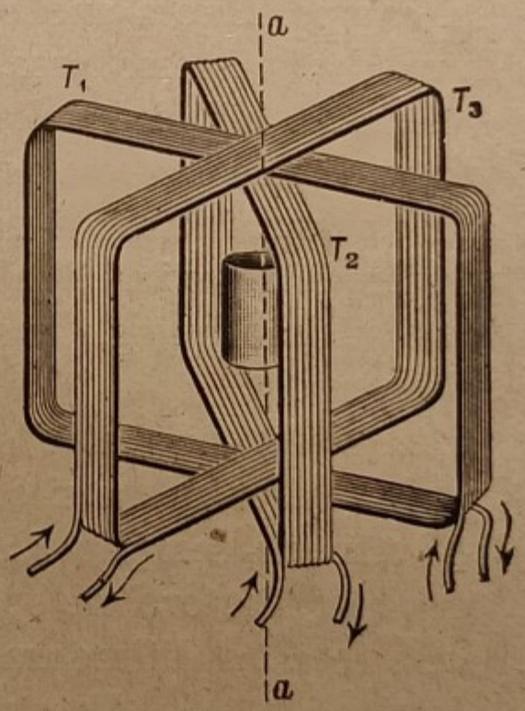


Fig. 464.

302. Alternomotori - Campo rotante Ferraris. — Fra i vari motori a corrente alternata, detti alternomotori, descriveremo solo il *motore trifàse*, ma la spiegazione di esso richiede la nozione del famoso *campo magnetico rotante* o *campo Ferraris*. L'invenzione di un tal campo è dovuta al genio di Galileo Ferraris (1885), che lo concepì essendo insegnante di Elettrotecnica nel Politecnico di Torino.

Un tal campo magnetico può ottenersi con una qualunque corrente polifàse; generalmente lo si ottiene con una *trifàse*. Si hanno 3 circuiti di filo di rame isolato avvolti sopra 3 telai T_1 T_2 T_3 i cui piani formano angoli di 60° (fig. 464). Dei 6

capi, 3, in ordine conveniente, sono uniti tra loro sì da costituire un punto neutro come avveniva nei tre circuiti dell'indotto di un alternatore trifàse e gli altri 3 sono uniti ai tre poli di un alternatore trifàse. Non sarebbe difficile dimostrare che lo spazio compreso nei 3 telai diviene un campo magnetico, tale però da mantenere una intensità *costante*, ma una direzione variabile. In modo concreto la direzione del campo *ruota con moto uniforme* attorno all'asse comune *a a* dei telai. Si ha in sostanza un campo quale si avrebbe fra i poli di una calamita o elettrocalamita a ferro di cavallo, facendola ruotare, con moto uniforme, attorno a una retta perpendicolare alla linea dei poli e complanare con le sue branche. Ma il campo Ferraris si ottiene senza spreco di energia per produrre il movimento delle calamite, non essendoci nel sistema ideato alcun movimento.

Un ago magnetico girevole intorno alla retta *aa* disposto entro i 3 telai si mette a ruotare con la velocità di rotazione del campo. Ruota anche un cilindro di rame disposto girevole intorno allo stesso asse, perchè il campo magnetico rotante genera nel cilindro delle correnti di induzione, le quali equivalgono come è noto a dei magneti, e perciò tra il campo rotante e le correnti indotte avranno luogo delle forze di verso tale da mettere in rotazione il cilindro, nel senso del campo, e che tendono ad imprimergli una velocità di rotazione eguale a quella del campo.

Su questo principio sono fondati appunto i *motori trifàsi*. La preferenza che si dà a tali motori deriva soprattutto dalla loro estrema semplicità; quelli di piccola potenza non presentano nè collettore, nè spazzole, e in essi la parte mobile, detta anche *rotor*, a differenza della parte fissa che genera il campo rotante e che si dice *stator*, può essere costituita di un sol blocco di metallo.

L'invenzione dei motori a campo rotante ha dato all'Elettrotecnica un impulso straordinario, avendo reso possibile un larghissimo uso industriale delle correnti alternate, sovratutto della corrente trifàse, ed ha facilitato la soluzione del problema del trasporto dell'energia a grandi distanze.

Trasformatori - Produzione e distribuzione dell'energia elettrica.

303. Trasformatori rotativi. — Dicevamo poco addietro che nell'industria si usa oggi quasi sempre la corrente alternata. In limitate applicazioni, per i tram delle città, per effetti elettrolitici, ecc., si usa però la corrente continua che si ottiene trasformando la corrente alternata distribuita oggi universalmente agli utenti dalle Aziende elettriche. Ciò è ottenuto coi *trasformatori rotativi*, che consistono nell'accoppiamento di un alternomotore con una dinamo a corrente continua.

Per applicazioni che richiedono limitate quantità di energia la corrente alternata può anche essere *raddrizzata*, usando speciali *raddrizzatori* come s'è accennato nel paragrafo 269.

304. Trasformatori statici. — Questi apparecchi, fatti di organi assolutamente fissi, trasformano una corrente alternata in un'altra pure alternata della stessa frequenza, ma a diverso potenziale.

Un trasformatore comprende, come la dinamo, due avvolgimenti distinti: l'uno induttore, detto anche *primario*, l'altro indotto, o *secondario*. Il primo, percorso da una corrente *primaria* variabile genera delle variazioni di flusso; il secondario diventa sede di una f. e. m. indotta e per conseguenza di una corrente *secondaria*.

Noi già conosciamo un semplice tipo di trasformatore, il rocchetto di Ruhmkorff (292), capace di elevare a decina di migliaia di volta la tensione di pochi volta di una pila. Ma il rocchetto di Ruhmkorff, che pur offre segnalati servigi in diverse applicazioni, non si presta come trasformatore industriale per il suo basso rendimento.

I trasformatori industriali per corrente alternata semplice sono formati di un *circuito magnetico*, che è un rettangolo cavo di ferro MN, ottenuto sovrapponendo molti lamierini di ferro separati da fogli di carta, per combattere anche qui le dannose correnti di Foucault.

La figura 465 mostra lo schema di un trasformatore per corrente alternata semplice, nel quale gli avvolgimenti primario P e secondario S sono fatti separatamente sui lati opposti del nucleo di ferro. Ma in pratica, come mostra la fig. 466, sopra ciascuno dei lati opposti del nucleo sono fatti due avvolgimenti, dimodochè i due sottostanti, uniti insieme, formano un unico circuito coi capi in A_1 B_1, e insieme sono uniti anche gli avvolgimenti esterni, così da formare un circuito unico coi capi in A_2B_2.

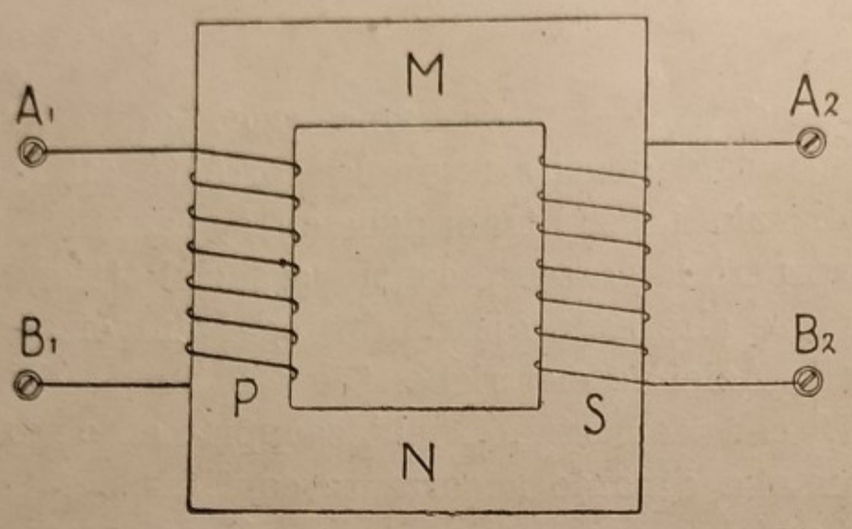


Fig. 465.

Se n_1 e n_2 sono rispettivamente i numeri di spire dei circuiti A_1B_1 e A_2B_2, facendo passare per il circuito A_1B_1 una corrente alternata che desta ai punti A_1B_1 una d. d. p. ossia una tensione E_1 e avente una intensità I_1, ai capi A_2B_2 del secondo circuito otterremo una corrente alternata della stessa frequenza, ma con tensione E_2 e intensità I_2 tali che, prescindendo da ogni perdita, sarà:

$$E_1I_1 = E_2I_2;$$

indicando così l'eguaglianza fra la potenza E_1I_1 consegnata al primario e quella E_2I_2 resa dal secondario.

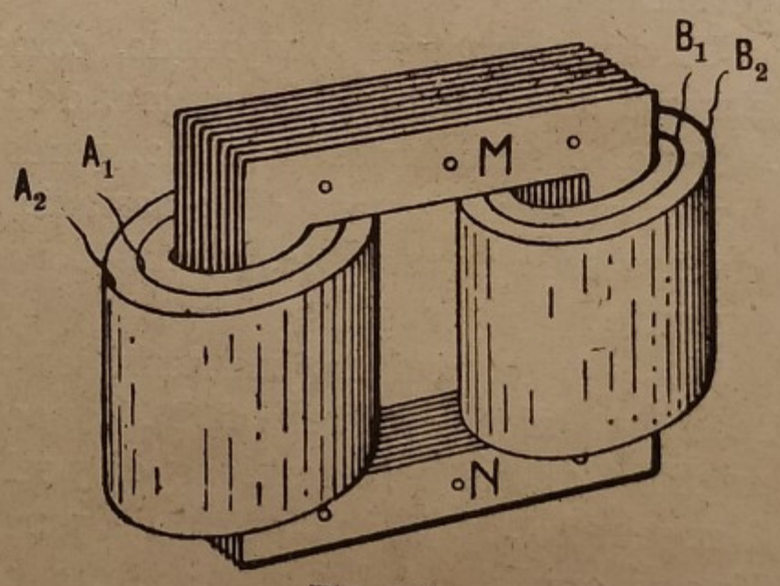


Fig. 466.

Oltre a ciò, in base a una teoria che non possiamo svolgere, è soddisfatta anche la seguente relazione fra le tensioni e i numeri di spire:

$$E_1 : E_2 = n_1 : n_2.$$

Dimodochè se la corrente affidata al primario A_1B_1 è quella di un alternatore a 10.000 volta e a 900 ampère, e il rapporto $n_1 : n_2$, detto *rapporto di trasformazione*, è 1 : 6, se i capi del secondario A_2B_2 sono collegati ai fili di linea, su questa avremo una corrente alla tensione $E_2 = 10.000 \times 6 = 60.000$ volta, con un'intensità $I_2 = 900 : 6 = 150$ ampère.

Usato in questa maniera il trasformatore funziona da *elevatore* di tensione.

Ma può egualmente compiere un ufficio opposto, basta unire i fili della corrente ad alto potenziale coi capi dell'avvolgimento del trasformatore che ha il più grande numero di spire; dai capi dell'altro circuito si raccoglie la corrente a potenziale più basso.

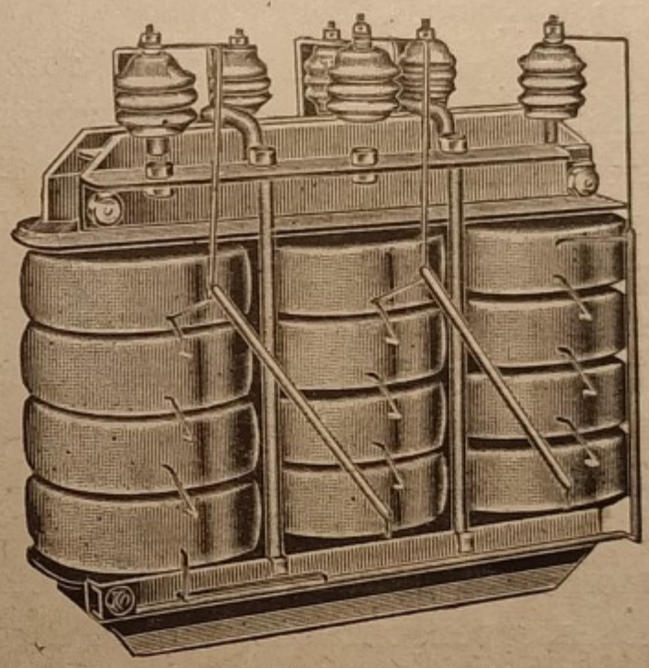


Fig. 467.

È ovvio intendere che il fenomeno che si compie in un trasformatore è un puro e semplice fenomeno d'induzione. La corrente alternata lanciata in uno dei due circuiti magnetizza il nucleo alternativamente nei due sensi opposti; le conseguenti variazioni alternative di flusso nell'altro circuito vi destano la corrente di induzione anch'essa alternata con lo stesso periodo di quella che percorre il primo circuito. Il rapporto tra le forze elettromotrici delle correnti induttrice e indotta, è, come s'è poco sopra affermato, eguale al rapporto tra i numeri delle spire dei rispettivi circuiti.

La figura 467 riproduce un trasformatore trifàse industriale.

Il rendimento di un buon trasformatore è elevatissimo, potendo arrivare a $^{95}/_{100}$.

305. Centrali elettriche. — Tra le forze naturali gratuite che finora l'uomo ha saputo mettere a profitto vanno in primo luogo poste quelle dovute alle cadute d'acqua. Grandi masse

d'acqua sollevate in origine dal calore solare, si trovano accumulate nelle montagne sotto forma di laghi, nevai, ghiacciai, ecc. Le cascate che ne derivano, fino a qualche tempo addietro, disseminavano in inutile e insensibile riscaldamento delle loro acque l'energia che possiedono.

Noi Italiani, che non possediamo carbone se non in misura insignificante, per mantenere in moto i nostri stabilimenti e i nostri treni, dovevamo ricorrere quasi interamente al costoso carbone fornitoci dall'estero, mentre il *carbone bianco*, così anche si chiamano oggi le cascate, scorreva inutile verso il mare.

Oggi però molte nostre forze idrauliche sono utilizzate, molte sono in via di utilizzazione, sicchè è sperabile che fra non molto il nostro carbone bianco, che la natura ci largisce con tanta prodigalità, possa, se non del tutto, almeno in gran parte sostituire il carbone nero, ed emanciparci dal gravosissimo tributo che dobbiamo alle altre Nazioni per importarlo.

Ma la utilizzazione delle cascate d'acqua divenne economicamente possibile solo per i recenti progressi dell'Elettrotecnica. Si noti infatti che nel maggior numero dei casi le cascate si trovano in luoghi di difficile accesso, nelle gole delle montagne, lontane dai grandi centri abitati. Perciò vicino alle cascate vengono costruite le *centrali idroelettriche*, alle quali, mediante enormi tubazioni, da un dislivello che supera spesso qualche centinaio di metri, arriva l'acqua che si raccoglie sulle montagne o per la pioggia o per la fusione delle nevi e dei ghiacciai. Per assicurare la continuità delle cadute, si costruiscono in alto dei bacini o laghi artificiali, capaci di milioni di metri cubi d'acqua, sbarrando con enormi dighe i corsi d'acqua naturali. L'acqua attraverso i tubi arriva alle centrali mettendo in moto le turbine, che fanno girare gli alternatori.

306. Trasporto e distribuzione dell'energia elettrica. — La corrente ottenuta nella centrale viene portata ai luoghi di consumo, che spesso sono assai distanti, mediante fili di rame isolati, sostenuti da pali, mediante isolatori di porcellana o di vetro.

Ma va tenuto presente che, malgrado il nessun costo d'origine di questa energia, per utilizzarla occorre fare delle ingenti spese per gli sbarramenti, le canalizzazioni, il costo del macchinario, delle linee di trasporto, ecc.; occorre perciò che il costo dell'energia elettrica che arriva a destinazione renda proficuo l'impiego dei capitali. È dunque sopra tutto necessario che la perdita di energia lungo la linea dovuta all'effetto Joule, che è, come si sa (269), proporzionale al quadrato dell'intensità della corrente, sia ridotta a una frazione convenientemente piccola dell'energia totale trasportata.

Supponiamo che sia W watt la potenza da trasportare; occorre per ciò che la dinamo fornisca una d. d. p. di E volta ed una intensità di corrente di I ampère, di modo che si abbia:

$$W = E \times I.$$

Fissato quindi il valore di W, che è uno dei dati del problema, il tecnico può a volontà dare alle grandezze E ed I valori diversi, all'unica condizione che il loro prodotto rimanga costante. Può, cioè, dare ad E un valore elevato e ad I un valore modesto, o viceversa.

Il primo dei metodi è da preferirsi, data la necessità di usare per ragioni di economia condutture fatte con fili di rame di sezione non troppo elevata, perchè allora solo una piccola parte dell'energia totale si perderà in calore nella linea.

Ecco quindi spiegata la convenienza degli alti potenziali, o, come si dice, delle *alte tensioni* nei trasporti di energia a grande distanza.

E fu appunto dopo che i tecnici riuscirono a generare correnti ad alto potenziale, che tali trasporti son diventati possibili. Oggi si realizzano trasporti di energie a potenziali superiori ai 200 mila volta, coi quali si trasportano a centinaia e migliaia di chilometri delle potenze di migliaia di kilowatt con pochi fili di modesta sezione.

Si noti però che l'uso di tensioni molto elevate negli apparecchi di utilizzazione — lampade, motori, ecc. — sarebbe inopportuno e pericoloso; inoltre anche gli alternatori delle centrali, specialmente per la difficoltà di assicurare fra i diversi

organi un perfetto isolamento, non possono direttamente produrre l'energia a tensioni molto alte. Perciò nella centrale sono collocati dei trasformatori statici (304) che elevano la tensione della corrente generata dagli alternatori, in modo che essa percorra la linea ad alta tensione, ed altri trasformatori sono istallati al luogo di arrivo che abbassano la tensione della corrente che viene dalla linea, in modo da distribuirla agli utenti alle tensioni adatte ai diversi usi.

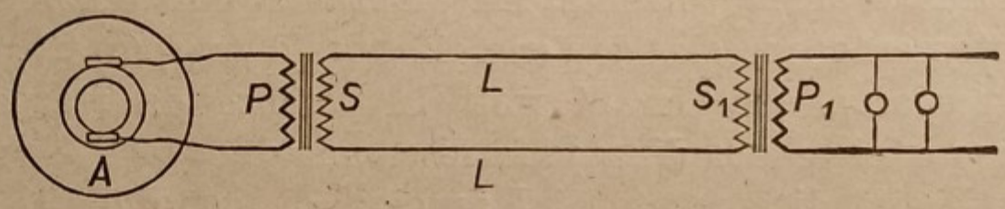


Fig. 468.

La figura 468 dà una sommaria idea di un trasporto di energia elettrica ([1]).

A è l'alternatore, *PS* il trasformatore che eleva il potenziale sulla linea *LL*, S_1P_1 il trasformatore all'arrivo che abbassa il potenziale al limite richiesto.

Più spesso all'arrivo la trasformazione si eseguisce, diremo così, in due tempi, cioè con un primo trasformatore, avente per esempio, un rapporto di trasformazione $\frac{1}{10}$, si abbassa il potenziale, supponiamo, da 60.000 volta a 6000. Questa trasformazione si fa di solito nelle officine delle Società fornitrici dell'energia elettrica, che stanno verso la periferia della città. La corrente a 6000 viene condotta mediante cavi sotterranei in diversi punti della città, in ciascuno dei quali trovasi una stazione secondaria di trasformazione, nella quale un altro trasformatore, avente supponiamo il rapporto 1 : 25 o 1 : 50 abbassa il potenziale a 6000 : 25 = 240 volta, o a 6000 : 50 = 120 volta

---

([1]) Per rappresentare schematicamente un trasformatore è invalso l'uso di adoperare una doppia linea a zig-zag, la *più marcata* delle quali rappresenta il circuito che ha il *minor* numero di spire. Il nucleo di ferro è segnato con 3 linee parallele fra la doppia linea a zig-zag.

che sono su per giù i potenziali dei conduttori che entrano nelle abitazioni per alimentarvi le lampade.

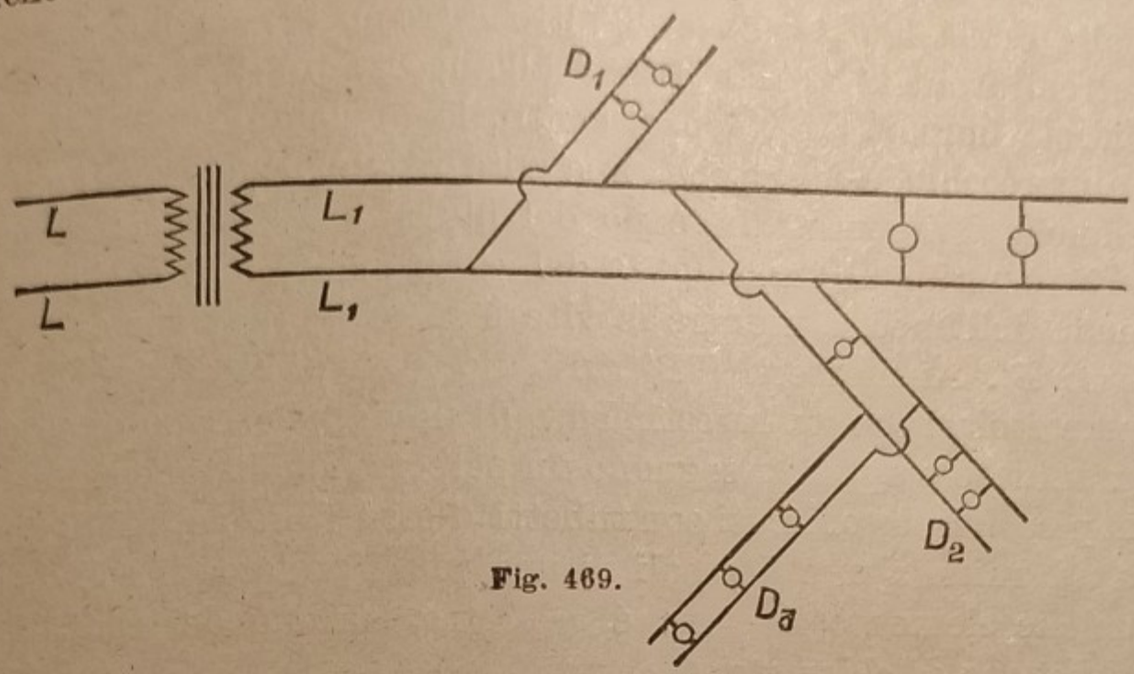


Fig. 469.

I conduttori a basso potenziale L_1L_1 (fig. 469) vengono poi ramificati formando dei circuiti derivati $D_1D_2D_3$... per fornire la corrente agli apparecchi utilizzatori, lampade, e motori, che sono quasi sempre alimentati in derivazione.

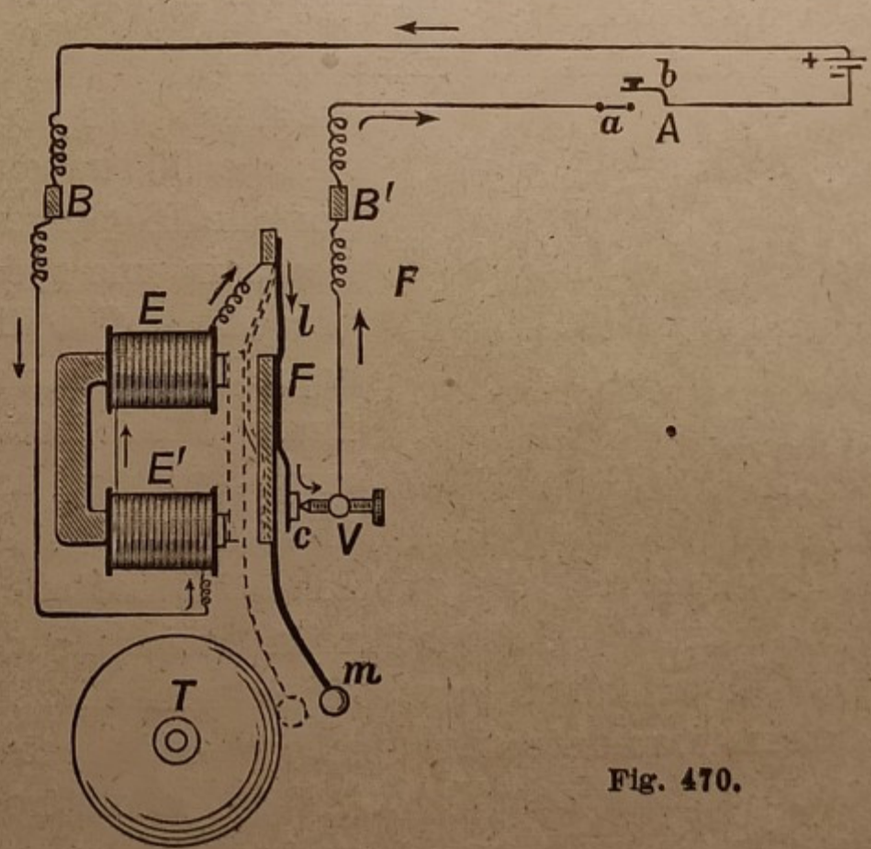


Fig. 470.

Telegrafo e Telefono.

307. Campanello elettrico (figura 470). — Il campanello elettrico è formato di un'elettrocalamita e di un'àncora che mette in azione un martello che colpisce una piccola campana.

L'elettrocalamita *EE'* a ferro di cavallo, è fissata sulla base dell'apparecchio ed ha di fronte l'àncora *F* sostenuta dalla molla *l* e portante all'altro estremo il martello *m*. Alla estremità della molla fissata all'àncora, in *c*, si trova una piccola borchia di argento, contro la quale appoggia, quando l'apparecchio è in riposo, una vite regolabile *V* la cui punta è anche d argento. Un capo del filo di rame dell'elettrocalamita è unito al serrafilo *B* del campanello, l'altro capo alla molla dell'àncora, mentre la vite è in comunicazione col morsetto *B'*. Ai morsetti *BB'* arrivano i *fili di linea*, formati di rame, isolati con un rivestimento di un doppio strato di cotone paraffinato e appaiati seguono un percorso qualunque sostenuti da piccoli isolatori fatti con tubetti d'osso. Uno dei fili di linea va ad unirsi a uno dei poli di una pila, formata di solito con qualche elemento Leclanché, e l'altro ad uno dei contatti *a* del *bottone di chiamata A*.

Un altro filo di rame unisce l'altro polo della pila con l'altro contatto *b* del bottone di chiamata.

Questo bottone è formato di solito di una piccola base di legno che si fissa al muro, sulla quale si trovano due lamine metalliche, che vengono a contatto l'una coll'altra quando si spinge un bottone *B* sporgente da un foro praticato in una specie di cappuccio di porcellana *C* o di altra sostanza che copre le due lamine accennate. Nella figura 471 il bottone di chiamata è rappresentato, in sezione normale alla sua base.

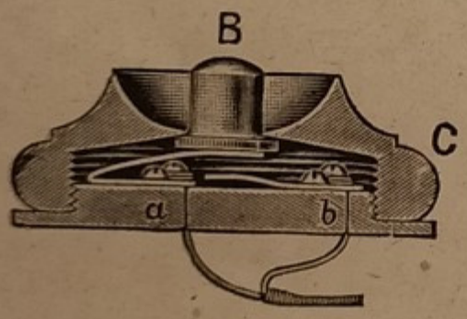


Fig. 471.

Avviene così che premendo il bottone la corrente passa nel circuito, l'elettrocalamita attira l'àncora che obbliga il martello a battere contro la campanella. Ma allora il circuito automaticamente si rompe per il distacco del contatto di argento *c* dalla vite *V* (fig. 470) e la elettrocalamita risultando inattiva, la molla riporta indietro l'àncora. Con ciò viene ristabilito il contatto fra la borchia di argento e la vite e il fenomeno si ripete per tutto il tempo che si tien premuto il bottone.

308. Telegrafo elettrico. — Qualunque sistema di telegrafia è formato di apparecchi atti a trasmettere rapidamente dei segnali a grande distanza.

Ogni telegrafo elettrico comprende le seguenti parti:

1° Un generatore di corrente — pile o accumulatori —.

2° Un trasmettitore che lancia i segnali.

3° Un ricevitore che li riceve.

4° Nei telegrafi *a filo*, c'è inoltre il *filo di linea* che unisce il trasmettitore col ricevitore.

Per ottenere poi la reciprocità di trasmissione dei segnali fra le due stazioni, occorre che ciascuna sia provveduta del trasmettitore, del ricevitore e della pila. E le cose devono essere regolate in modo che nei periodi di riposo, i due ricevitori sieno uniti alla linea per esser pronti in ogni istante a ricevere i segnali trasmessi dalla stazione opposta.

Qui descriveremo solo il *telegrafo Morse*, per ragione della sua grande semplicità e del suo uso estesissimo.

Il *trasmettitore Morse*, detto anche *manipolatore* o *tasto* (fig. 472), è una leva metallica girevole intorno a un asse A che permanentemente comunica col filo di linea L. A sinistra c'è un bottone d, detto *bottone di contatto*, fissato sulla base e in comunicazione con un polo della pila, col quale la leva allo stato di riposo non comunica, rimanendone staccata per azione di una molla f. L'altro polo della pila comunica col suolo. Soltanto quando si preme sull'impugnatura M avviene il contatto fra la leva e il bottone d, e in tal modo, come vedremo, viene lanciata la corrente che dà il segnale.

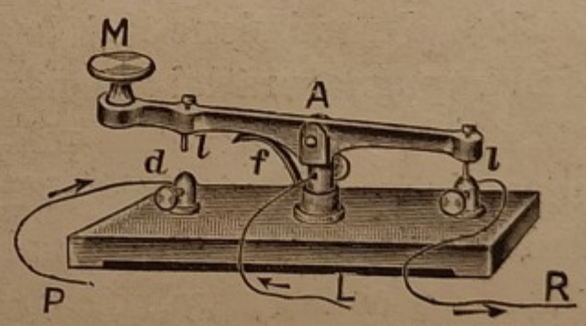


Fig. 472.

Il *ricevitore Morse* è formato di una elettrocalamita E (fig. 473) uno dei capi del filo della quale comunica permanentemente colla linea e l'altro col suolo. Una leva di 1° genere pNM porta in D un'àncora di ferro dolce che sta sopra i poli della elettrocalamita E, tenuta però staccata dai poli stessi per l'azione di

una molla a spirale *R*. L'estremità *p* della leva poggia dal disotto contro un nastrino di carta *A*, detto *zona*, che vi striscia sopra svolgendosi con moto uniforme da un tamburo per effetto di un movimento di orologeria. Poco sopra la zona, in

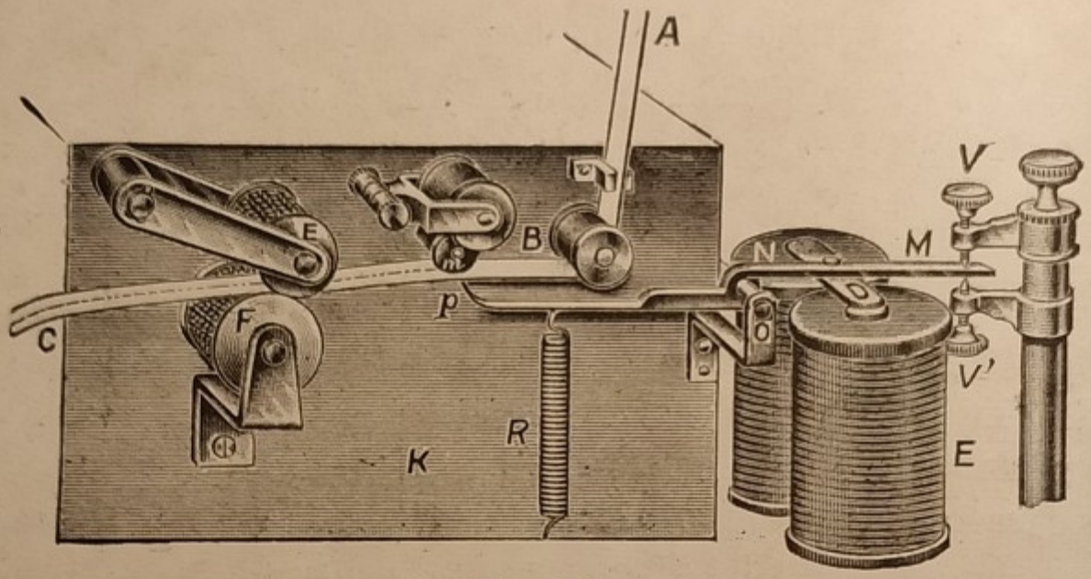


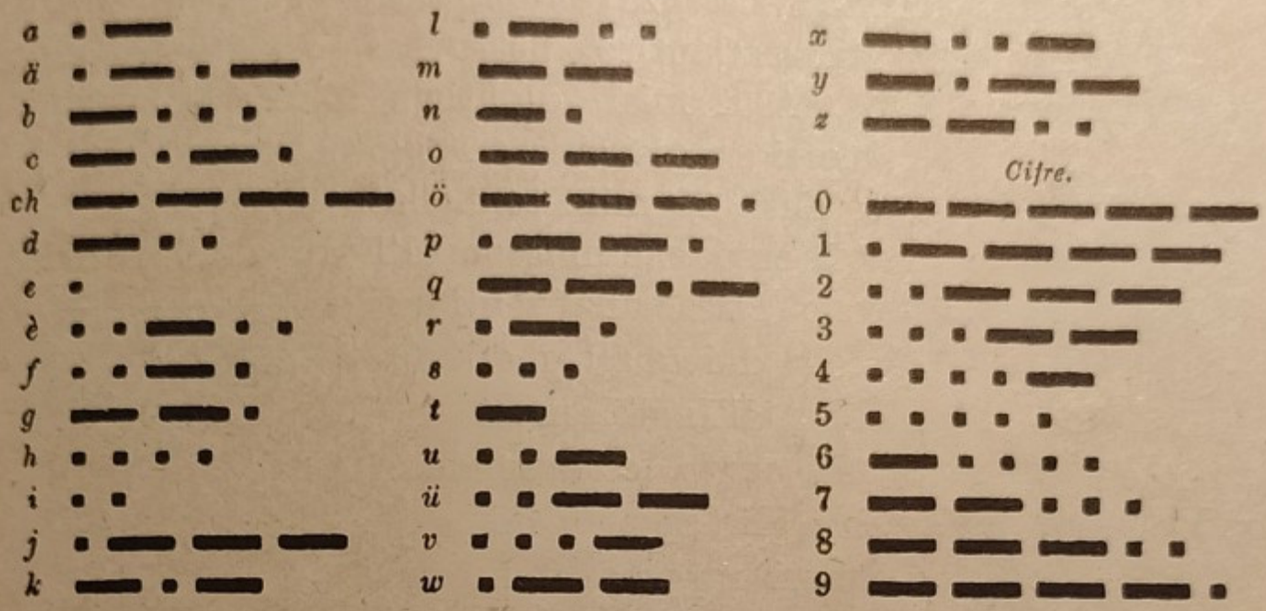
Fig. 473.

corrispondenza dell'estremo *p* della leva, si trova una piccola ruota, girante per azione dello stesso meccanismo, tagliata a spigolo alla periferia e costantemente bagnata d'inchiostro. Questa rotella dunque non tocca la zona finchè l'àncora rimane staccata dalla elettrocalamita.

309. Trasmissione dei segnali. — Quando però si preme sull'impugnatura del trasmettitore (fig. 472), il circuito è chiuso: difatti la corrente della pila passa, attraverso il bottone *d*, alla leva, da questa va al filo di linea, circola nella elettrocalamita *E* del ricevitore (fig. 473), va al suolo, e attraverso questo, che funziona da conduttore, torna all'altro polo della pila. La elettrocalamita tira in giù l'ancora e in tal modo la zona, dall'estremo *p* della leva che vi poggia contro, è sollevata e messa a contatto con la rotella bagnata d'inchiostro. Si forma così nel mezzo della zona un segno rettilineo più o meno lungo a seconda della durata della corrente. Il segno finisce di prodursi non appena, cessata la pressione sulla leva del trasmettitore, la corrente cessa.

Per formare le parole bastano due specie di segni: il *punto* — segno corto — che corrisponde a una brevissima emissione della corrente, e la *linea* — segno più lungo — che corrisponde

a un'emissione di corrente per un tempo un po' maggiore. Punti e linee, combinati secondo una convenzione generale, costituiscono l'*alfabeto*, come segue:



Le parole sono separate da intervalli maggiori di quelli che separano i segni di una lettera.

310. Linee telegrafiche. — La linea telegrafica è formata dal filo conduttore che collega le due stazioni, e si hanno linee *aeree*, *sotterranee* e *sottomarine*.

Per le linee aeree si usa, in ragione della maggiore resistenza alla rottura, anzichè filo di rame, filo di ferro galvanizzato; ma ora molte linee si fanno con leghe di rame — bronzo fosforoso e silicioso —.

In ogni modo il filo è sostenuto da mensole di ferro fissate ai pali o ai muri, coll'intermedio di isolatori di porcellana.

I conduttori sotterranei e sottomarini, che vengono anche detti *cavi*, sono formati di più fili di rame (fig. 474), ordinariamente 7, girati a cordone e ricoperti di un grosso strato di guttaperca. Sopra questo c'è un inviluppo di protezione diversamente fatto a seconda delle speciali esigenze. Nei cavi transatlantici fanno parte dell'inviluppo alcuni grossi fili di

ferro, ricoperti di canapa catramata per proteggerli dall'azione dell'acqua marina, che girando ad elica a largo passo, costituiscono una specie di robusto tubo di protezione che conferisce al cavo una grande resistenza alla rottura.

Il primo cavo transatlantico, posto nel 1866 fra l'Irlanda e Terranova, è lungo 1852 miglia nautiche, pari a 3435 chilometri e pesa oltre 11 kg. per metro, cioè in totalità 38 mila tonnellate circa.

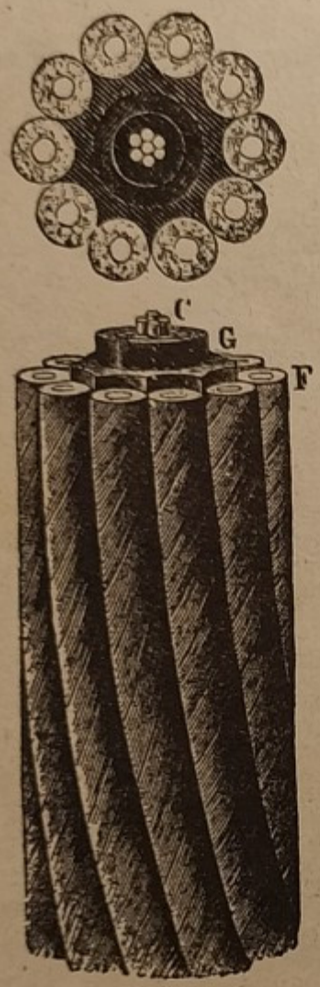


Fig. 474.

I cavi che uniscono l'Europa all'America sono circa una ventina, molti dei quali mettono capo all'Inghilterra.

È ovvio comprendere che gli apparecchi descritti rappresentano un complesso telegrafico dei più semplici. Nei grandi impianti telegrafici si usano apparecchi assai più complicati, capaci di trasmettere i telegrammi in lettere stampate, e di trasmettere anche contemporaneamente parecchi telegrammi su un solo filo.

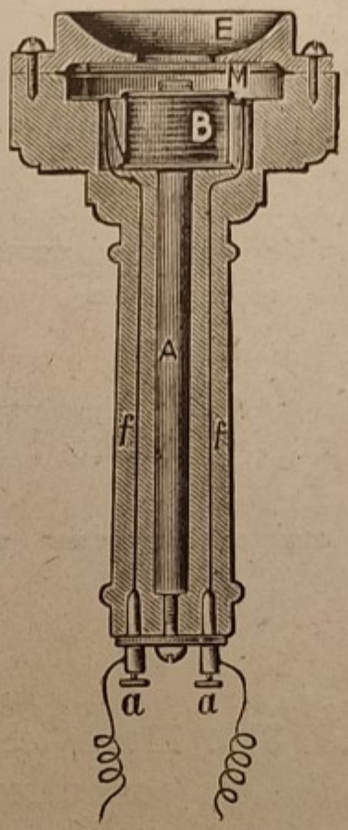


Fig. 475.

311. Telefono magnetico. — Questo meraviglioso apparecchio è di origine italiana; fu infatti Paolo Meucci, livornese, che lo ideò, trovandosi in America, verso il 1876. Con tuttociò l'apparecchio è comunemente noto col nome di telefono *Bell*, un americano che ne prese il primo brevetto verso la stessa epoca.

Lo stesso apparecchio serve da trasmettitore e da ricevitore senza l'intervento di pile. La figura 475 mostra l'apparecchio in sezione. *A* è una calamita rettilinea permanente, collocata in una impugnatura di ebanite, circondata a un estremo da

un rocchetto *B* fatto con un avvolgimento di sottil filo di rame isolato, i capi del quale sono uniti ai morsetti *a a*. Una sottile lamina di ferro dolce *M*, fissata al contorno, si trova a una piccola distanza dal polo che sporge appena dal rocchetto e sopra di essi apre un piccolo padiglione o imboccatura *E*, atta a rinforzare i suoni.

Quando si parla davanti alla membrana *M*, le vibrazioni della voce la obbligano ad avvicinarsi e allontanarsi dalla calamita, senza che avvenga mai contatto. Da ciò derivano alternative modificazioni delle linee di forza della calamita (209), vale a dire delle variazioni di flusso attraverso il piccolo rocchetto dove per conseguenza hanno origine delle correnti di induzione, che attraverso il doppio filo di linea, vanno a circolare nel rocchetto del ricevitore. Queste correnti modificano il magnetismo della calamita di questo apparecchio, donde conseguono nella membrana rispettiva delle vibrazioni identiche a quelle della membrana del ricevitore. Accostando l'orecchio al padiglione del ricevitore si sente la ripetizione della parola.

Il numero delle vibrazioni essendo lo stesso nel trasmettitore e nel ricevitore, l'altezza del suono non rimane alterata; l'ampiezza però è maggiore nella lamina del trasmettitore che nel ricevitore, quindi i suoni rimangono indeboliti; il timbro risulta alquanto alterato dalle vibrazioni proprie che le lamine vibranti aggiungono a quelle della voce.

Tuttavia le correnti indotte risultano assai deboli, e se si vuole telefonare a distanze un po' grandi, con che le correnti si indeboliscono anche maggiormente per la resistenza offerta dai fili di linea, i suoni non riescono sufficientemente percettibili.

L'apparecchio descritto, nella sua forma moderna risulta in qualche dettaglio perfezionato, particolarmente usando, anzichè una calamita rettilinea, una calamita a ferro di cavallo recante ai poli due rocchetti appiattiti, sì che i poli corrispondono alla regione centrale della lamina vibrante. Ma in ogni modo la disposizione descritta può essere usata solo per comunicazioni a breve distanza, per esempio, fra due locali dello stesso edifizio.

312. Microfono. — Per le comunicazioni a grande distanza il telefono descritto rimane solo come ricevitore, perchè come trasmettitore si usa il *microfono*. Esso, nella sua primitiva forma realizzata dall'Hughes, si compone di un bastoncino di carbone *CD*, con gli estremi a punta, impegnato tra due cavità praticate in due pezzi di carbone *A* e *B* che gli lasciano una certa mobilità (fig. 476).

I pezzi *A* e *B* sono fissati a una tavoletta verticale e mediante i due morsetti *b* e *b'*, con cui comunicano, sono chiusi

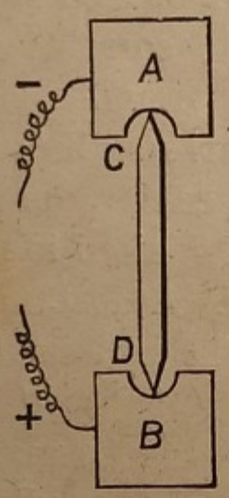


Fig. 476.

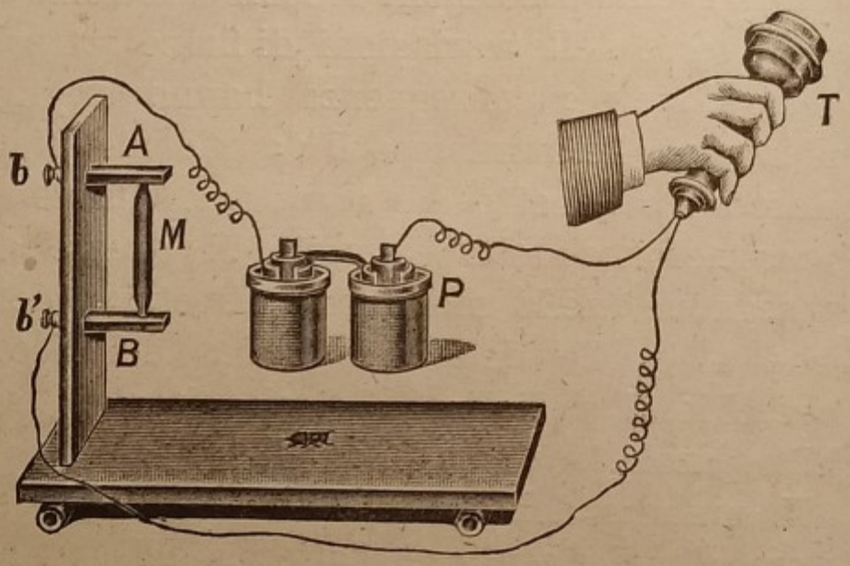


Fig. 477.

in un circuito con una pila *P* e col telefono *T*, che può trovarsi anche molto distante (fig. 477).

Parlando davanti al microfono, le vibrazioni della voce operano piccolissimi spostamenti dei punti di contatto del pezzo di carbone mobile coi pezzi fissi. Da ciò conseguono delle *variazioni di resistenza* del circuito, e per la 2ª legge di Ohm, delle variazioni nell'intensità della corrente, che modificano il magnetismo della calamita del ricevitore, col risultato di avere delle vibrazioni nella membrana, che ripete i suoni trasmessi.

Il tic-tac di un orologio posato sulla tavoletta del microfono viene percepito a grande distanza; e si può anche udire distintamente il rumore di un insetto che cammini sulla stessa tavoletta.

La parola trasmessa col microfono descritto presenta alla ricezione un timbro metallico per la concomitanza di vibra-

zioni proprie dei pezzi stessi del microfono. Nella telefonia moderna si adoperano altri tipi di microfono nei quali l'inconveniente è di molto attenuato.

313. Cenno sulle centrali telefoniche. — La più importante applicazione del telefono è di permettere la comunicazione fra gli abbonati di una città e anche da una città all'altra. Lo scopo è raggiunto mediante le *Centrali telefoniche* alle quali mettono capo i fili di linea degli apparecchi di tutti gli abbonati.

Le linee telefoniche sono quasi sempre a doppio filo, poichè l'uso della terra come conduttore di ritorno è possibile solo dove non è a temersi l'induzione. Nelle città dove le vie sono percorse da numerosi fili per telegrafi, luce, tram, ecc., le linee telefoniche a filo semplice, con ritorno per la terra, subirebbero forti perturbazioni per effetto dell'induzione.

Oggi però sia per l'ingombro eccessivo che porterebbero i numerosissimi fili e per eliminare i pericoli delle perturbazioni atmosferiche, si diffonde l'uso di cavi sotterranei, costituiti da un fascio di doppi fili isolati l'uno dall'altro con una semplice striscia di carta e avvolti ad elica. Le coppie sono alla lor volta isolate l'una dall'altra con un altro avvolgimento di carta e unite in fascio da un rivestimento di cotone, protetto all'esterno da piombo.

Fig. 478.

La messa in comunicazione tra due utenti del telefono vien fatta alla Centrale o manualmente o con sistema automatico. Nel primo caso l'impiegato che fa servizio alla Centrale, avuta la chiamata dall'abbonato X lo mette in comunicazione coll'abbonato Y richiesto. Ma il diffondersi dell'uso del telefono, ha fatto aumentare enormemente il numero degli abbonati, sì che per semplificare il servizio molte Centrali sono oggi *automatizzate*. Un abbo-

nato può col nuovo sistema ottenere la comunicazione con chi vuole, componendo il numero dell'abbonato richiesto, movendo un disco numerato girevole annesso al suo apparecchio.

La figura 478 mostra un telefono automatico da tavolo, portante sul davanti il disco a numeri, e in alto l'apparecchio mobile, formato del microfono, a sinistra, e del telefono, a destra, uniti fra loro.

Onde elettromagnetiche.

314. Cenno sulla teoria elettromagnetica della luce. — La luce, in base all'ipotesi ondulatoria proposta dall'Huygens, è ritenuta un movimento vibratorio che si compie nelle sorgenti luminose e che si trasmette nello spazio mediante vibrazioni dell'*etere cosmico*, sostanza elastica estremamente tenue, che dovrebbe compenetrare i corpi in tutte le loro molecole e occupare tutti gli spazi intersiderali. Oggi si ammette ancora che nelle sorgenti luminose esistano dei corpuscoli vibranti, ma questi sono degli elettroni (240) che col loro moto producono nello spazio circostante un campo elettrico e magnetico ad un tempo, ossia un campo elettromagnetico, che subisce delle rapide *variazioni* le quali costituiscono le così dette *onde elettromagnetiche*.

Un elettrone che vibra eseguendo un moto oscillatorio, diventa centro di emissione di onde elettromagnetiche, che, partendo da esso, si propagano nello spazio con la velocità della luce, ed hanno la stessa frequenza con cui l'elettrone vibra.

Le onde elettromagnetiche a seconda della loro frequenza ossia della loro diversa lunghezza d'onda (200) costituiscono svariatissime radiazioni; quelle a grande lunghezza d'onda, da qualche chilometro a un metro circa, sono utilizzate nelle radiocomunicazioni; quelle ad onde più corte, da 1 decimo di millimetro a 0,8 micron, formano i raggi infrarossi; i raggi luminosi competono a lunghezze d'onda da 0,8 a 0,4 micron; dopo vengono i raggi ultravioletti, i raggi X, ecc. Sinchè le diverse radiazioni hanno la stessa natura, sono tutte delle variazioni dei campi elettromagnetici prodotti da elettroni

vibranti e si differenziano unicamente per la differente lunghezza d'onda.

L'ipotesi esposta, formulata dall'inglese Maxwell, ha avuto la più brillante conferma dai lavori di una schiera di fisici eminenti fra i quali va annoverato il nostro Righi.

315. Produzione di onde elettromagnetiche. — Esponiamo brevemente qualche apparecchio generatore delle onde elettromagnetiche comprese nei limiti utilizzati nella telegrafia e telefonia senza fili.

Il primo apparecchio è stato costruito nel 1889 da Enrico Rodolfo Herz sotto il nome di *oscillatore*. Lo riproduce la figura 479.

Due aste metalliche allineate portano alle estremità più distanti due grosse sfere pure metalliche MN e dall'altra parte due sferette CC' alla distanza di pochi millimetri. Riunendo le aste coi morsetti di un rocchetto di Ruhmkorff R in azione, ad ogni apertura del primario una certa quantità di elettricità si porta sulle sfere MN, e se tale quantità è abbastanza grande, le sferette CC' assumono una d. d. p. sufficiente a dare tra esse una scintilla. Le sfere MN costituiscono in questo apparecchio le armature di un condensatore e la scarica è oscillatoria con periodo brevissimo.

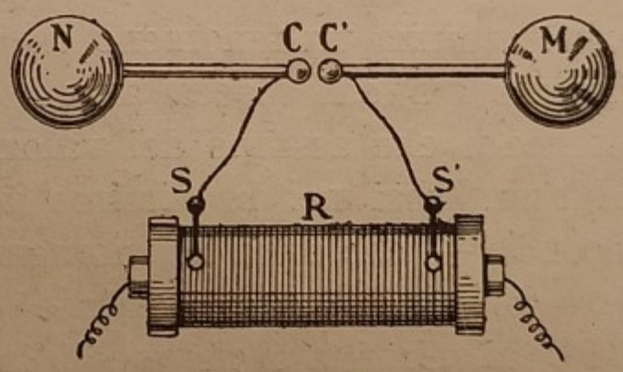


Fig. 479.

Il funzionamento di tale oscillatore non riesce troppo regolare; perciò è della massima importanza la disposizione ideata da Sarasin e De-la-Rive che consiste nel far scoccare la scintilla nell'olio comune.

Il Righi trovò conveniente l'uso dell'olio di vaselina, e diede all'oscillatore una forma tale che si può chiamare a *tre scintille*.

Tale oscillatore rappresentato in schema nella figura 480 porta due piccole sfere metalliche F ed E comunicanti con la sorgente ad alto potenziale, per esempio un rocchetto di Ruhmkorff, che si trovano rispettivamente vicine alle asticelle DC e AB terminanti pure con sfere metalliche delle

quali le *C* e *B* restano inmerse nell'olio di vaselina. Messo in azione il rocchetto scoccano tre scintille alla volta due esterne fra *F* e *D* e fra *E* ed *A* e una terza entro l'olio. È quest'ultima che ha carattere oscillatorio. A questo proposito occorre spiegarci. Una scintilla non è un fenomeno tanto semplice come parrebbe. Essa è costituita da una serie di scintille rapidamente susseguentisi a intervalli di piccolissime frazioni di secondo e che l'occhio non separa per il noto fenomeno della persistenza delle immagini sulla retina. La fotografia delle scintille, ne dà la prova più convincente. La scarica che produce la scintilla

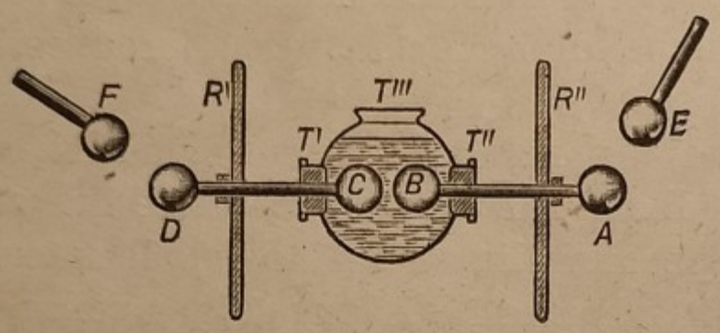


Fig. 480.

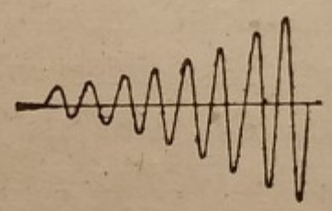


Fig. 481.

è in sostanza un fenomeno oscillatorio, dovuto al fatto che le sferette fra cui scocca assumono una d. d. p. rapidamente alternata che assume dei valori rapidamente decrescenti fino ad annullarsi nel brevissimo tempo — circa 1 millesimo di secondo — che dura il fenomeno. Le variazioni di tale d. d. p. possono essere rappresentate dalla curva della figura 481. Ad ogni scintilla si ha perciò la formazione nello spazio di un campo elettromagnetico alternativo, cioè la propagazione nello spazio di un sistema d'onde, detto anche da alcuni *treno d'onde*, rapidamente *smorzate*.

Però occorre sapere che con gli apparecchi moderni vengono generate delle *onde persistenti*, che conservano cioè un'ampiezza costante; ma non essendo il nostro compito di fare della radiotecnica non accenneremo nemmeno a tali apparecchi.

316. Il coherer. — Le onde elettromagnetiche viaggiano nello spazio colla velocità della luce, ma non sono avvertite dall'occhio. Esistono però numerosi rivelatori.

Per la storia, e più ancora per un giusto senso di dignità nazionale, diamo un cenno del *coherer*, che serve molto bene anche per elementari esperienze scolastiche. Esso è fondato sopra un principio che, se non proprio scoperto, fu studiato con un'indagine sistematica dal nostro prof. Calzecchi, fin dal 1884 quando ancora non si parlava di telegrafia senza fili.

È per noi doveroso di rivendicare la priorità delle nostre geniali scoperte, e tanto più quanto minore è il senso di giustizia che gli stranieri mostrano nel riconoscere i nostri meriti:

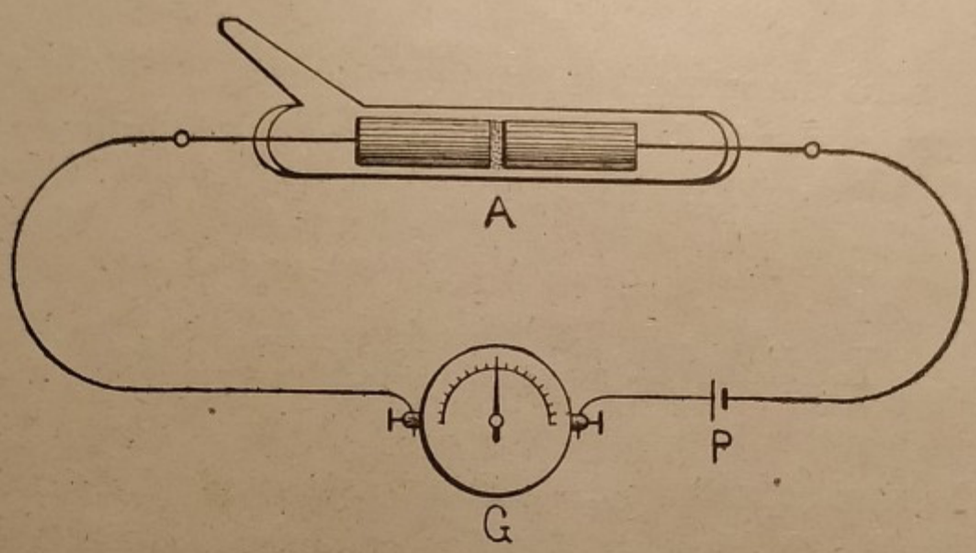


Fig. 482.

in Francia si attribuisce senz'altro al Branly il merito di quanto è espresso nei lavori del Calzecchi pubblicati sei anni prima delle esperienze di Branly.

Il *coherer*, detto anche *radioconduttore*, nella forma che il nostro Marconi seppe portare a un grado di perfezione forse non superabile, è formato di un tubo di vetro *A* lungo da 4 a 6 cm., del diametro interno da 3 a 4 mm. (fig. 482). Dentro il tubo si trovano due cilindretti di argento che lo chiudono quasi esattamente, aventi le estremità affacciate ben piane e parallele separate da un intervallo di circa mezzo millimetro riempito con limatura metallica. Il Marconi ottenne il risultato migliore con un miscuglio di limatura di 96% di nichel e 4% di argento. La quantità di polvere introdotta nel piccolo intervallo fra i due cilindri, deve essere tale da non risultare compressa, di modo che ai singoli granelli rimanga una certa libertà di movimento.

Se si chiude in circuito il coherer con un elemento di pila Leclanché e con un galvanometro nelle condizioni ordinarie questo accusa solo una corrente debolissima, in causa della grandissima resistenza che oppone la limatura.

Se però in vicinanza dell'apparecchio si fa agire un oscillatore, il galvanometro presenta una grande deviazione, per la brusca diminuzione di resistenza subìta dalla limatura, ma anche cessate le scintille dell'oscillatore, il coherer mantiene, se lo si lascia perfettamente in riposo, la conducibilità acquistata.

Basta però imprimere al tubetto qualche piccola scossa perchè esso riprenda la sua elevata resistenza normale e ridiventi atto ad avvertire altre onde.

Radiotelegrafia e radiotelefonia.

317. I primi esperimenti. — Fatta astrazione dalle esperienze dell'inglese D. E. Hughes, che datano dal 1879, rimaste senza seguito, il primo ad utilizzare il principio del coherer per la trasmissione dei segnali, fu l'inglese Lodge fin dal 1893.

Nell'aprile 1895 il prof. Popoff dell'Accademia militare di Kronstadt, fece conoscere un apparecchio, da lui inventato, col quale riesciva a registrare le scariche atmosferiche.

Il primo brevetto del nostro Marconi data dal 2 giugno 1896, ed in esso sono descritti gli apparecchi di trasmissione e di ricezione, non sostanzialmente diversi da quelli costruiti già da altri sperimentatori.

« Rimane però al nostro Marconi il merito indiscutibile di aver preso un'audace iniziativa, laddove da altri non erano state fatte che delle timide proposte, e di aver trasportato nel campo pratico ciò che altri avevano soltanto intraveduto o realizzato in iscala minore. Ma l'ingegno e le facoltà inventive sue si rivelarono pienamente più tardi, per l'abilità colla quale vinse le numerose difficoltà, e per tante modificazioni ed aggiunte di dettaglio in gran parte essenziali per il successo

pratico, che furono da lui introdotte e riunite in quell'insieme, che a ragione può chiamarsi il *sistema Marconi* » (1).

Prima però di descrivere sommariamente gli apparecchi trasmittenti e riceventi occorre accennare a un fatto che ha avuto sullo sviluppo delle radiocomunicazioni un'importanza eccezionale. Se le onde elettromagnetiche si diffondessero secondo sfere aventi per centro la stazione trasmettitrice, la legge del quadrato della distanza, valida per il suono e per la luce, ci porterebbe a concludere l'impossibilità o quasi di una trasmissione a grande distanza perchè l'energia irradiata si disperderebbe rapidamente, dimodochè per avere segnali sensibili la stazione trasmittente dovrebbe irradiare una enorme energia. Oltre a ciò la curvatura della Terra, permetterebbe solo la comunicazione tra due stazioni in vista l'una dell'altra.

Il meccanismo della propagazione delle onde elettromagnetiche è ben diverso: per varie ragioni gli scienziati oggi ammettono che negli alti strati atmosferici esista uno strato d'aria fortemente ionizzato (282) e perciò conduttore della elettricità, detto *strato di Heaviside*. Tale strato ha per conseguenza anche la proprietà di riflettere, come uno specchio, le onde elettromagnetiche, proprietà che ha anche la superficie della Terra. Così le onde irradiate da una stazione restano chiuse tra il suolo e lo strato di Heaviside riflettendosi alternativamente dall'uno all'altro senza che la loro energia ne venga rapidamente dispersa. Ciò spiega come le onde elettromagnetiche possano girare intorno alla Terra, permettendo la comunicazione anche fra due luoghi agli antipodi.

318. Stazione radiotelegrafica trasmettente. — Diamo qui un succinto cenno d'una stazione trasmettente col sistema *a scintilla* usata nei primordi della radiotelegrafia. In questa stazione si trova un oscillatore *O* del tipo Herz o Righi, alimentato da un rocchetto di Ruhmkorff *R*, nel circuito primario,

---

(1) Righi e Dessau: *La Telegrafia senza filo*.

nel quale è inserito un tasto T, come quello del telegrafo Morse (fig. 483). Una delle sfere dell'oscillatore è unita al suolo e l'altra a un conduttore isolato A, detto *antenna* o *aereo* che termina in alto con conduttori di forma diversa.

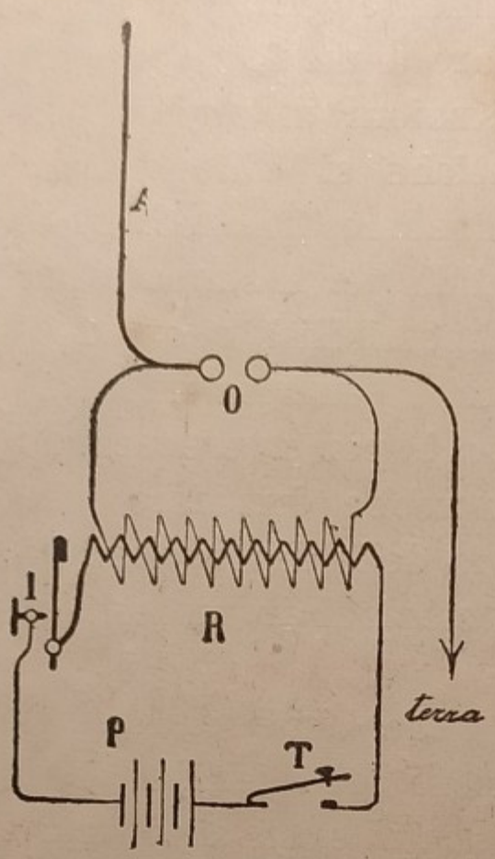


Fig. 483.

Abbassando il tasto T, scoccano fra le due sfere delle scintille attraverso le quali l'antenna riesce in comunicazione col suolo e vi si scarica producendo una serie di oscillazioni elettriche rapidamente smorzate, e quindi irradia nello spazio delle onde elettromagnetiche. Le poche scintille che scoccano durante un breve abbassamento del tasto, irradiano una successione di *treni d'onda* (fig. 484). Questi treni sono formati di pochi elementi per un brevissimo abbassamento del tasto quale si conviene per avere un *punto* dell'alfabeto Morse, e di più elementi in corrispondenza d'*una linea*.

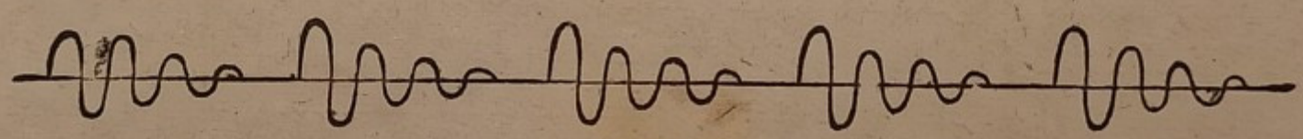


Fig. 484.

319. Stazione ricevitrice. — Le onde irradiate dalla stazione trasmettente possono essere rivelate alla stazione ricevitrice. In questa si trova in primo luogo un ricevitore d'onde, supponiamo un coherer C, chiuso in un circuito di cui fa parte una pila P formata di un elemento Leclanché e una elettrocalamita assai sensibile E che comanda un'àncora N (fig. 485). Quest'àncora fa parte di un secondo circuito comprendente una pila P' di un numero sufficiente di elementi, un ricevitore Morse M, e un'elettrocalamita che comanda un'àncora T portante un martellino m, posto vicino al coherer.

Si capisce facilmente il risultato; non appena il coherer avverte l'arrivo delle onde, l'elettrocalamita E diventa attiva,

l'àncora N attratta da essa tocca il contatto a, così viene chiuso il circuito comprendente il Morse e si forma il segnale sulla carta; ma nello stesso tempo il martellino m percuote il coherer che viene riportato nelle condizioni normali, il segno sulla carta cessa di prodursi e tutto è pronto per avvertire l'arrivo dei successivi treni d'onde.

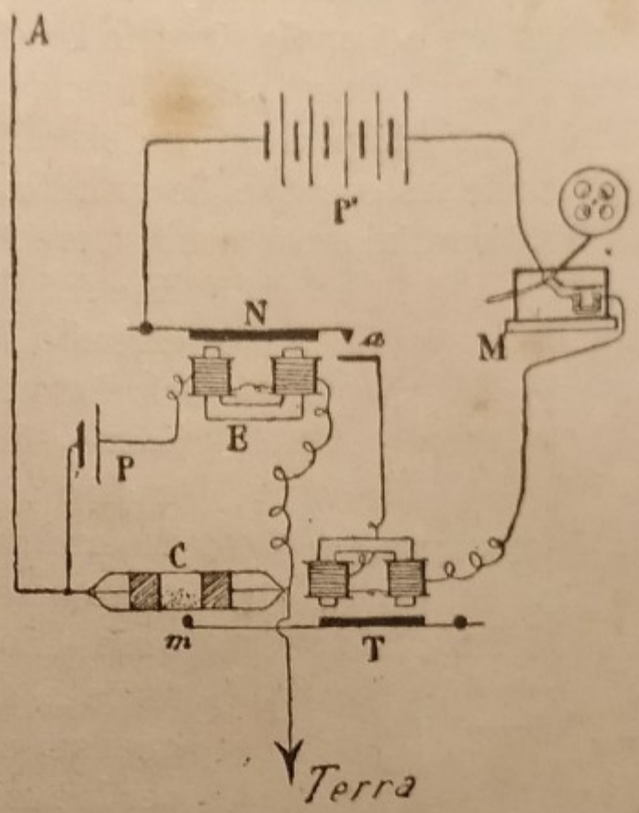


Fig. 485.

320. Altri rivelatori. — La portata della trasmissione usando il coherer è, malgrado tutti i perfezionamenti apportativi, assai limitata; il Marconi però ottenne segnali a due mila miglia di distanza (12 - 12 - 1901).

Più sensibile è il *rivelatore a cristalli.* Esso è formato di un filo metallico molleggiante che ha un estremo a contatto con la faccia di un cristallo talora di carborundum, tal altra di galena o pirite (fig. 486). Questi apparecchi acquistano sotto l'azione delle onde elettriche la curiosa proprietà detta della *conducibilità unilaterale*, vale a dire se essi son chiusi in circuito con una sorgente di corrente alternata, lasciano passare solo le semionde di uno stesso senso.

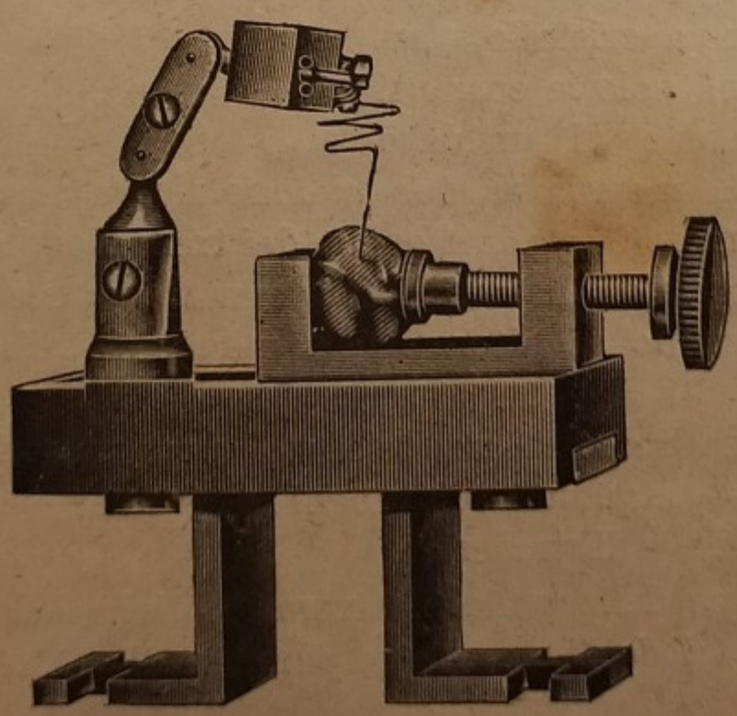


Fig. 486.

Un sistema ricevente a galena è schematizzato nella fig. 487. L'aereo *A*, attraverso a un avvolgimento di spire *H*, è in comunicazione col suolo. Questo avvolgimento costituisce il primario di un trasformatore (304) senza nucleo di ferro, il secondario *K* del quale, fa parte di un circuito comprendente il rivelatore *D*, il condensatore *C* colle armature unite ad un telefono *T*. Con tale disposizione il conduttore formato dall'aereo, dal primario *H* e dal filo che va a terra, che vien detto circuito *aereo-terra*, è unito al circuito del rivelatore *induttivamente*. L'arrivo dei treni d'onde all'aereo determina nel circuito aereo-terra una serie di correnti alternate ad alta frequenza, che agiscono per induzione sul circuito telefonico, nel quale per l'azione spiegata dal rivelatore a cristallo, passano solo le correnti indotte di un dato senso. Per conseguenza la membrana del telefono riceve una serie di impulsi, il cui numero è eguale a quello dei treni d'onde e non a quello delle singole oscillazioni di ciascun treno; così il telefono produce un suono di altezza corrispondente alla frequenza dei treni.

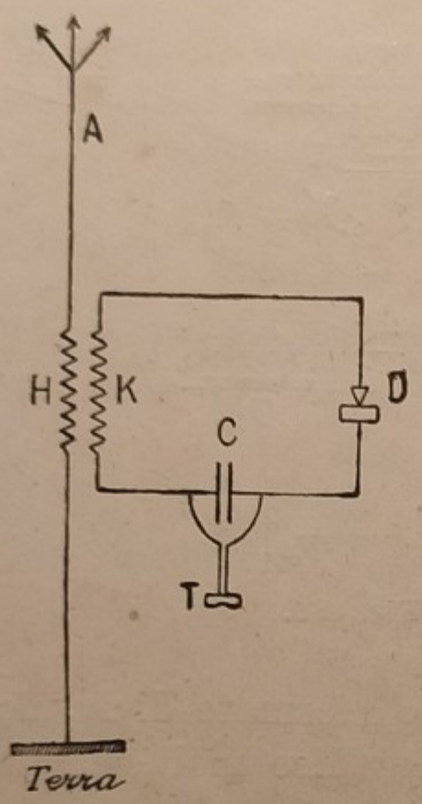


Fig. 487.

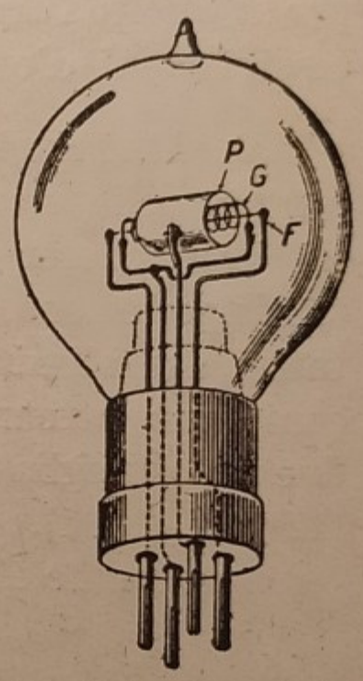


Fig. 488.

I segnali Morse vengono percepiti nel telefono come piccoli rumori brevi — i punti —, alquanto più lunghi — le linee —. Il radiotelegrafista li legge e li trascrive.

Ma il rivelatore principe delle onde elettromagnetiche è la *lampada a tre elettrodi* o *triòdo* di cui è fatto parola nell'effetto termoionico (287).

Il triòdo si presenta più o meno nella forma di una lampada elettrica a incandescenza e porta nell'interno 3 elettrodi: un *filamento* di tungsteno *F* (fig. 488) reso incandescente dalla

corrente di pochi volta portatagli attraverso due dei quattro *piedini* che sporgono dallo zoccolo. Attorno al filamento si trova una spiralina metallica G, detta *griglia*, che comunica con un altro piedino; e il terzo elettrodo, comunicante col quarto piedino, è la *placca* P, talora formata di un cilindretto metallico cavo che avvolge senza toccarla, la griglia.

Nella bolla di vetro è fatto un vuoto assai spinto e nel circuito filamento-placca è inserita, insieme con un galvanometro G', una batteria di pile o accumulatori E_2 a circa 100 volta, il polo positivo essendo unito alla placca e il negativo al filamento (fig. 489).

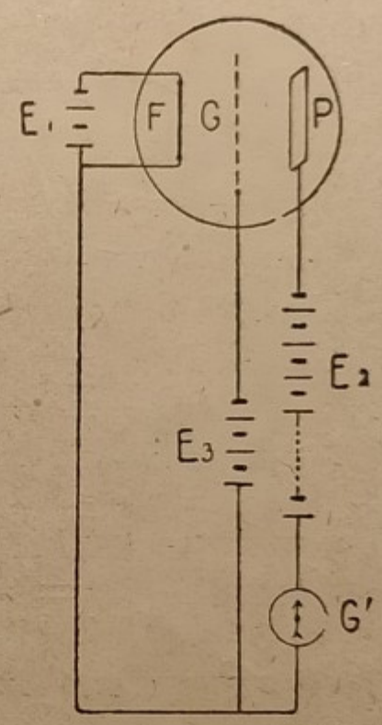


Fig. 489.

In causa dell'effetto termoionico, quando il filamento è incandescente, il galvanometro accusa una corrente che può arrivare a 10 milliampère. Tale corrente si stabilisce evidentemente attraverso lo spazio della lampada compreso tra il filamento e la placca, e le fa da veicolo il flusso elettronico che si dirige nettamente dal filamento alla placca, in grazia del più alto potenziale di questa.

Or è evidente che ogni causa capace di modificare il campo tra il filamento e la placca, modificherà anche la corrente osservata, cioè la corrente nel circuito che per brevità è chiamato *circuito placca*.

Vediamo ora l'ufficio della griglia riferendoci alla stessa figura 489. Quest'organo è unito al filamento coll'intermedio di una f. e. m. E_3 che può avere, come si vedrà, diversa origine, e si ha così un altro circuito detto *circuito griglia*.

Non possiamo entrare in una minuta analisi dell'ufficio di quest'ultimo circuito, notiamo solo che lo stato elettrico della griglia modifica il campo nello spazio fra il filamento e la placca, di modo che se per una qualunque causa varia la f. e. m. E_3 e in conseguenza il potenziale della griglia, questa ostacola o favorisce il passaggio degli elettroni nel loro tragitto verso

la placca, ciò che ha per conseguenza immediata di far variare molto fortemente la corrente nel circuito placca.

Nell'uso pratico i circuiti del triòdo sono disposti come nella figura 490, nella quale basta far rilevare solo che la f. e. m. introdotta nel circuito griglia, è ottenuta congiungendo questo circuito *induttivamente* con il circuito aereo-terra; un telefono *T* è messo nel circuito placca. Le correnti alternate che passano nel circuito aereo-terra, che comprende il primario *H* di un trasformatore, il secondario *K* del quale fa parte del circuito griglia, determinano per induzione delle variazioni alternative del potenziale della griglia, le quali sono immediatamente avvertite nel telefono con notevole intensità.

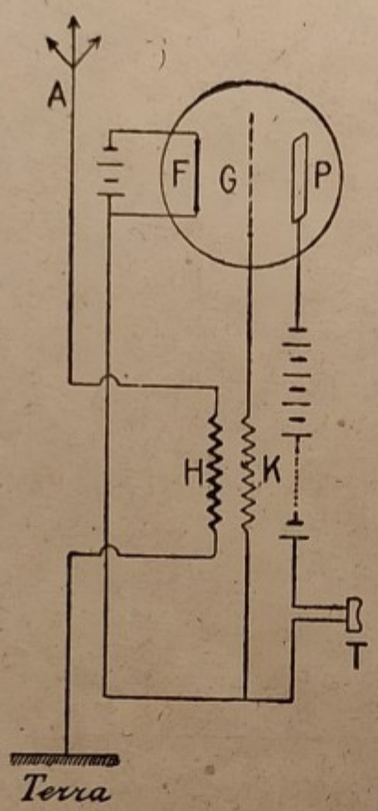


Fig. 490.

Nel descrivere succintamente il meccanismo di una radiocomunicazione, abbiamo omessi alcuni organi, che in realtà sono essenziali, ma che a descriverne la funzione ci porterebbero molto fuori delle linee di un programma elementare. Basterà dire che sia nel circuito antenna-terra del trasmettitore, sia in quello del ricevitore, vengono inseriti dei condensatori di capacità variabile, aventi l'importante ufficio, di *accordare* i circuiti, in modo che quello ricevente oscilli con la frequenza di quello trasmettente, esaltando così gli effetti ottenuti. Gli effetti sono poi particolarmente esaltati da speciali dispositivi — *amplificatori* — che sfruttano un'altra notevole proprietà del triòdo, l'amplificazione.

E anche non è fatto parola delle stazioni trasmettenti ad *onde persistenti*, generate ancora con l'uso di speciali triòdi, nelle quali le oscillazioni trasmesse conservano un'ampiezza costante e non sono smorzate come quelle date dalle scintille. Tutte o quasi le stazioni radiotrasmettenti sono adesso ad onde persistenti che hanno particolari pregi su quelle ad onde smorzate.

321. Radiotelefonia. — La telefonia senza fili, o come anche si chiama la *radiotelefonia*, è una variante della T. S. F.

Il microfono usato per la radiotelefonia agisce come il microfono della telefonia ordinaria, colla sola differenza che ha una struttura tale da sopportare la corrente di parecchi ampère. Parlando davanti al microfono le modulazioni della voce cambiano, come è noto, la resistenza del microfono, e quindi la corrente che lo attraversa cambia corrispondentemente di intensità. Queste vibrazioni della corrente che nella telefonia ordinaria vengono affidate ai fili di linea, nella radiotelefonia vengono trasportate a distanza mediante le onde elettriche.

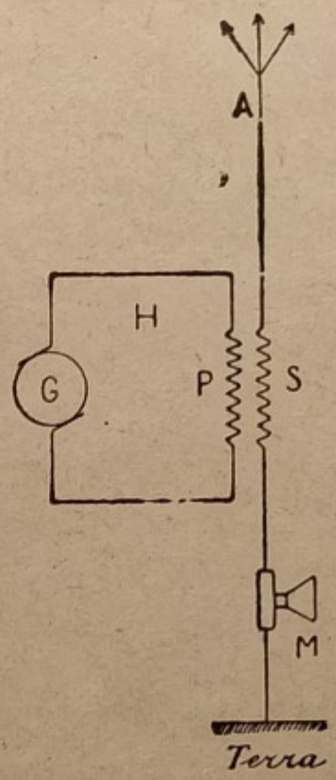


Fig. 491.

Descriveremo per sommi capi come il problema è stato praticamente risolto. Alla stazione trasmettitrice si ha un circuito oscillante *H* nel quale uno speciale apparecchio *G* genera delle oscillazioni elettriche *persistenti* (320) ad alta frequenza. Queste oscillazioni elettriche costituiscono in sostanza una corrente alternata di notevole intensità e di ampiezza costante; ma può raggiungere la frequenza di 500.000 e più periodi al secondo. Tale corrente oscillatoria circola permanentemente nel primario *P* di un trasformatore, il secondario *S* del quale è unito da una parte all'aereo *A*, e dall'altra attraverso un microfono *M*, alla terra (fig. 491).

La ricezione si fa col triòdo, come la ricezione radiotelegrafica.

Finchè non si parla davanti al microfono, le vibrazioni elettriche del circuito oscillante, agendo induttivamente sull'aereo, si ha una trasmissione di onde elettromagnetiche regolari. In tal caso il telefono della stazione ricevente è percorso da tutte le semionde di un certo senso, in causa della conducibilità unilaterale del triòdo. Queste semionde però, perchè si succedono ad intervalli di tempo estremamente brevi, riescono inefficaci sul telefono, in causa dell'inerzia della lamina vibrante, e producono in sostanza l'effetto che produce una corrente con-

tinua che passa nel telefono, per la quale, la membrana risulta immobilizzata o da una parte o dall'altra della posizione di riposo a seconda del senso della corrente. In conclusione, finchè non si parla davanti al microfono, il telefono ricevente resta muto.

Ma se davanti al microfono si produce un suono, le vibrazioni di questo si convertono in una corrente che ha un pro-

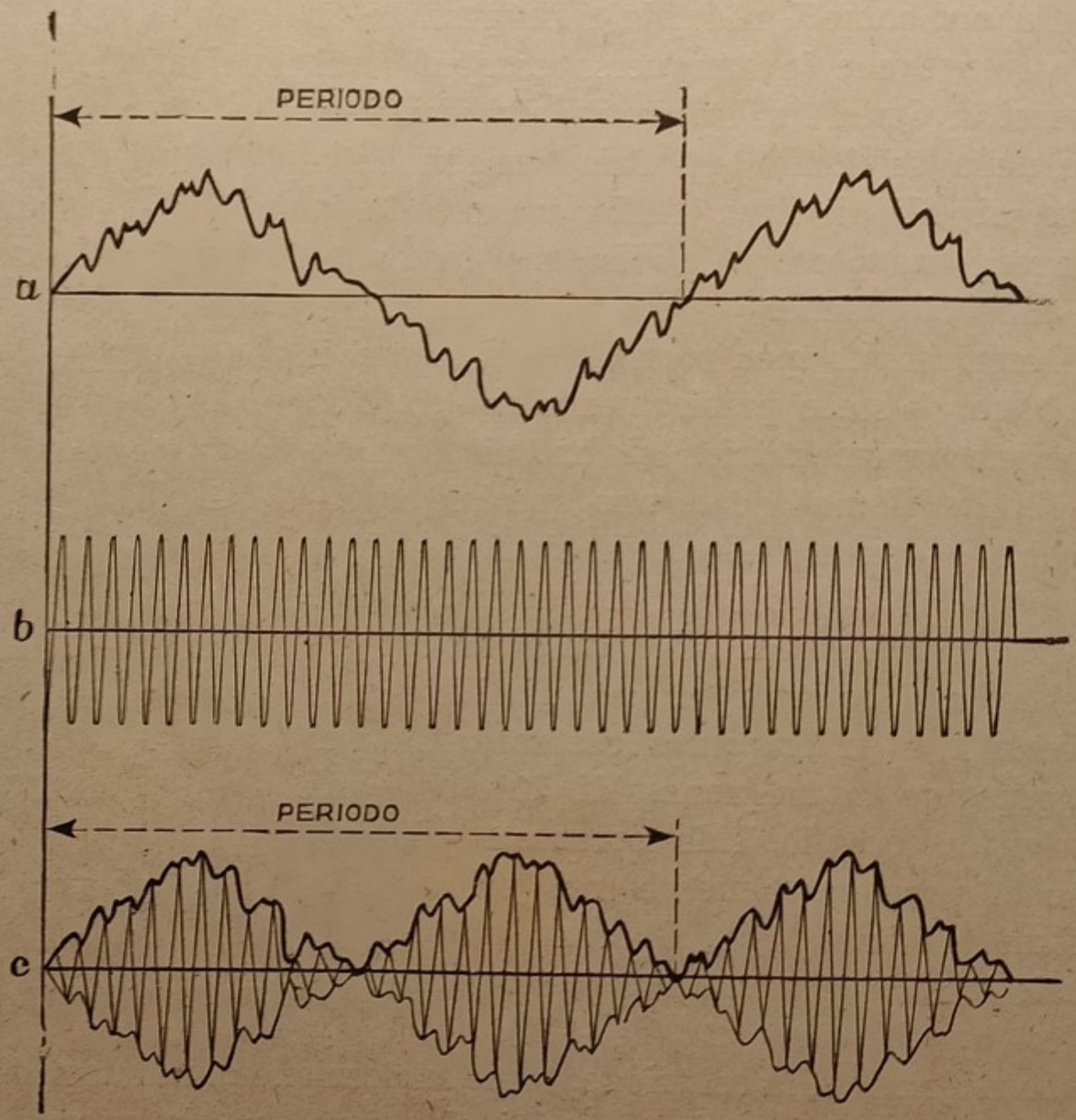


Fig. 492.

filo complicato (fig. 492, *a*), ma tale che le grandi variazioni della intensità avvengono con bassa frequenza. La corrente microfonica si sovrappone alle oscillazioni elettriche persistenti ad alta frequenza, emesse in modo continuo dalla stazione trasmettente, rappresentate nella figura 492 *b*, e queste ultime perdono per conseguenza la loro regolarità, a momenti presentando un'ampiezza maggiore della normale, in altri

minore (fig. 492, *c*). In ciò consiste il fenomeno detto *modulazione* delle oscillazioni emesse dalla trasmettente.

Le oscillazioni così modulate percorrono lo spazio, e poichè le variazioni della loro intensità avvengono con bassa frequenza, riescono percettibili al telefono.

I risultati ottenuti nella trasmissione sia della voce sia della musica sono meravigliosi, e gli apparecchi radioriceventi vanno diffondendosi con una rapidità vertiginosa specialmente all'estero. Numerosissime stazioni trasmettono ogni giorno a ore fisse notizie politiche e commerciali, conferenze, lezioni e musica, di guisa che anche le persone che abitano lontane dai grandi centri possono comodamente partecipare a tutte le manifestazioni della vita che si svolge a centinaia e a migliaia di chilometri di distanza. La radiotelefonia è già diventata uno dei mezzi più efficaci di propaganda e di coltura.

Unità elettriche.

322. Unità pratiche. — Diamo un riassunto delle principali unità elettriche del sistema pratico, incontrate nel corso del nostro studio.

1. - Il *coulomb*, l'unità di *quantità di elettricità*, equivale a 3.10^9 unità teoriche elettrostatiche (222).

2. - L'*ampère* è unità della *intensità di una corrente: una corrente costante ha l'intensità di* 1 *ampère se attraverso a una sezione del conduttore passa* 1 *coulomb di elettricità ad ogni secondo minuto* (238). Più concretamente l'ampère si definisce così: *una corrente costante ha l'intensità di* 1 *ampère se, fatta passare in un voltametro a nitrato d'argento, deposita sul catodo milligrammi* 1,1183 *di argento ad ogni secondo minuto* (253).

3. - Il *volta* è l'unità di *d. d. p.*: *tra due punti di un conduttore percorso dalla corrente esiste la d. d. p. di* 1 *volta se il lavoro eseguito nel conduttore per il passaggio di* 1 *coulomb di elettricità è* 1 *joule* (225).

Il volta è anche unità di forza elettromotrice - f. e. m. - (243).

4. - L'*ohm è la resistenza offerta a una corrente costante da una colonna di mercurio, a 0° di temperatura, di sezione uniforme, avente una lunghezza di cm.* 106,3 *e la massa di grammi* 14,4521.

5. - Il *faràd* è l'unità pratica di *capacità elettrica. È la capacità di un conduttore che acquista il potenziale di* 1 *volta, quando lo si carica con* 1 *coulomb di elettricità.* Più spesso si usano i sotto multipli del faràd, il *microfaràd* eguale a 1 milionesimo di faràd, e anche il *millimicrofaràd* equivalente a 1 millesimo di microfaràd, ossia a 1 miliardesimo di faràd.

6. - Il *watt*, unità di *potenza elettrica.* Una corrente che passa in un conduttore, *ha la potenza di* 1 *watt, se l'energia ossia il lavoro che vi compie è* 1 *joule al secondo* (281).

7. - Il *wattora* è unità di *energia elettrica*, cioè *è il lavoro eseguito in un'ora da una corrente della potenza di* 1 *watt.* Poichè 1 watt produce in 1 secondo il lavoro di 1 joule, in un'ora, eguale a 3600 secondi, produce il lavoro di 3600 joule. È quindi 1 wattora = 3600 joule.

L'energia elettrica fornitaci dalle Aziende elettriche per illuminazione, riscaldamento e forza motrice viene misurata da appositi contatori, e pagata in proporzione ai wattore o più spesso agli ettowattore o ai chilowattore consumati.

Costituzione della materia e fenomeni radioattivi.

323. Costituzione della materia. — La materia fu considerata per molti secoli come formata di *atomi* nel senso etimologico della parola, cioè da corpuscoli infinitamente piccoli, indivisibili. Si ammetteva l'esistenza di un certo numero di atomi, completamente diversi l'uno dall'altro, i quali aggregandosi in modo diverso per numero e per qualità davano origine alle molecole.

Le vedute sulla costituzione della materia hanno subìto una profonda modificazione particolarmente riguardo alla struttura dell'atomo. Questo non è più concepito come la più piccola particella di materia, ma lo si ritiene ulteriormente divisibile in elementi più piccoli. Oltre a ciò tutti gli atomi si ritengono formati dagli stessi elementi costitutivi, la diversità

degli atomi consistendo solo nel numero e nella disposizione degli elementi stessi.

Questi sono due soli: il *nucleo* e l'*elettrone*, come è stato con sufficiente larghezza spiegato nel paragrafo 240 relativo all'effetto Volta a cui rimandiamo per non ripeterci. Fissiamo ora la nostra attenzione solo sopra un fatto esposto in quel paragrafo, dove si dice che in determinate condizioni un atomo può perdere uno o più dei suoi elettroni, sicchè perdendo delle cariche negative, resta carico positivamente e diviene un ente detto *ione positivo*. Al contrario certi atomi possono appropriarsi uno o più elettroni, diventando allora dei *ioni negativi*. Gli elementi chimici detti *metalli* hanno la facilità di perdere elettroni e di trasformarsi quindi in ioni positivi, mentre i *metalloidi* possono acquistare degli elettroni trasformandosi in ioni negativi.

Il numero degli elettroni che l'atomo di un elemento è capace di abbandonare o di acquistare misura la *valenza* dell'elemento: così l'elemento metallico sodio è detto monovalente perchè l'atomo di sodio è capace di abbandonare un solo elettrone; l'ossigeno elemento metalloide è detto bivalente perchè ha l'attitudine di appropriarsi due elettroni.

Queste nozioni abbiamo richiamate dal citato paragrafo per spiegare la formazione di una molecola. Prendiamo in esame la molecola del cloruro di sodio — NaCl —. L'atomo del sodio, metallo monovalente, tende a perdere un elettrone, l'atomo del cloro, metalloide, anche monovalente, tende ad acquistare un elettrone. Se allora si pongono in presenza un atomo di sodio e un atomo di cloro, accade che l'atomo di sodio perderà un elettrone che si attaccherà all'atomo di cloro. Per conseguenza i due ioni formatisi per tale scambio, il ione positivo sodio e il ione negativo cloro, essendo carichi di nome contrario, si attrarranno per la legge di Coulomb (222) con una forza grandissima data la loro minima distanza, pur essendo piccolissime le cariche in presenza, formando una molecola di cloruro di sodio.

Tutti i corpi sono, così veduti, degli aggregati di molti atomi, ossia di nuclei e di elettroni. Se il corpo è solido e isolante, i nuclei e gli elettroni conservano quasi inalterate le loro posi-

zioni mutue, cosicchè tali corpi sono appunto isolanti perchè in essi non possono aversi movimenti di cariche elettriche. Nei conduttori solidi, cioè nei metalli, i nuclei restano sempre in vicinanza di certe posizioni di equilibrio, ma alcuni elettroni sono liberi di muoversi da un punto all'altro del metallo trasportando nel loro moto delle cariche elettriche, nel qual fatto consiste la corrente elettrica nei metalli.

324. Radioattività. — La maggiore conferma della teoria sulla costituzione dell'atomo è venuta dalla scoperta della *radioattività.*

Pochi mesi dopo la sensazionale scoperta dei raggi X fatta da W. C. Roentgen nel 1895, H. Becquerel scoprì i primi fenomeni della radioattività. Essa consiste nella emissione operata da varie sostanze di certi raggi, gli uni corpuscolari — α e β —, gli altri ondulatori — γ —, raggi la cui energia finisce per trasformarsi in calore.

Noi non possediamo finora alcun mezzo per attivare o per rallentare, anche in minima parte i processi radioattivi che si ritengono dovuti a una trasmutazione chimica, ossia a una *disintegrazione atomica.* Tutti i metalli il cui numero atomico (240) è superiore a quello del bismuto — 83 — e tutti i loro composti sono radioattivi.

Il Becquerel scoprì il primo fenomeno ponendo un cristallo di solfato doppio di uranio e potassio sopra una busta di carta opaca dentro la quale si trovava una lastra fotografica. Pose il tutto al Sole e, sviluppata la lastra, trovò una macchia nera sotto il cristallo. In seguito ottenne, con la stessa disposizione, lo stesso risultato lasciando il cristallo sopra la busta nella perfetta oscurità.

Così il Becquerel scoprì i così detti *raggi uranici*, detti poi anche *raggi di Becquerel.*

Lo stesso Scienziato subito dopo riconobbe che tali raggi, come i raggi X, erano capaci di ionizzare i gas; di modo che l'aria ionizzata, cioè resa più o meno conduttrice dell'elettricità, era capace di scaricare più o meno rapidamente un elettroscopio, al quale fosse stata precedentemente comunicata una carica. Ed è appunto dal tempo impiegato per ottenere una

stessa diminuzione di carica in un elettroscopio graduato, che si è pensato di desumere una misura relativa dei raggi uranici.

Tale proprietà dell'uranio, e quella più accentuata di altri corpi di cui ora parleremo, venne detta *radioattività*.

Poco dopo furono scoperti altri corpi *radioattivi*: il *torio*, il *polonio* — scoperto dalla signora Curie, e che essa chiamò con tal nome dalla sua patria di origine — e più tardi, per opera dei coniugi Curie, il *radio*.

Il radio si ricava dalla pechblenda, un minerale che prima serviva ad estrarre l'uranio. Da ciò che rimane dopo l'estrazione di questo corpo, con processi chimico-fisici speciali, lunghi, laboriosi e costosi, si ricava il radio, e nemmeno isolato, ma allo stato di *cloruro* e più spesso di *bromuro di radio*.

Per avere un'idea della difficoltà dell'estrazione di questa sostanza basta sapere che col trattamento dei residui di una tonnellata di pechblenda si ricavano appena da due a tre decigrammi di sale di radio. Ciò giustifica l'elevatissimo prezzo della straordinaria sostanza.

325. Radiazioni emesse dalle sostanze radioattive. — Mentre i raggi uranici o di Becquerel sono costituiti da elettroni in moto con grandissima velocità come quelli formanti i raggi catodici, i corpi radioattivi emettono una radiazione complessa, nella quale i Fisici hanno riconosciuto tre specie di raggi detti rispettivamente α, β e γ.

I raggi β non sono che i raggi Becquerel, gli α sono costituiti da ioni positivi in rapido moto; i raggi γ sono veri raggi X, ma di lunghezza d'onda assai piccola (286).

Dalla misura della carica elettrica e della massa delle particelle α è risultato che esse coincidono con la carica elettrica e con la massa dei nuclei dell'elio e si è poi accertato che esse sono effettivamente dei nuclei d'elio espulsi dagli atomi delle sostanze radioattive con velocità che possono arrivare a 20 mila Km. al secondo. Infatti si è constatato che molte particelle α, aggregandosi ciascuna a due elettroni, formano del vero e proprio elio.

326. Disintegrazione radioattiva. — Sono stati i fisici Rutherford e Soddy a formulare l'ipotesi che *gli atomi di un elemento*

radioattivo perdono durante il processo di radiazione, degli elettroni, quali i raggi β, oppure dei nuclei positivi, quali i raggi α. Essi allora diventano atomi di un nuovo elemento di peso atomico eguale, se emettono solo elettroni che hanno massa insignificante, o minore se emettono nuclei la cui massa non è affatto trascurabile. In tutti i casi gli atomi che derivano hanno proprietà fisiche e chimiche diverse da quelle dell'atomo che li ha generati. Il processo è detto *disintegrazione radioattiva.* Ad esempio un atomo di radio — peso atomico 226 — per espulsione di una particella α, dà un atomo di una sostanza detta *emanazione* del peso atomico 222. Ciò si può schematizzare nel modo seguente

Radio (226) = Emanazione (222) + Elio (4).

A sua volta l'atomo della emanazione, per espulsione di una particella α, dà luogo a un atomo di *radio A* — peso atomico 218, — e, così via. In questo modo si sviluppa una *famiglia radioattiva* il cui ultimo discendente è un elemento stabile.

Lo studio completo di queste relazioni genetiche, ha permesso di stabilire la genealogia di tre famiglie che hanno per capostipiti rispettivamente l'*uranio*, il *torio* e l'*attinio.* Più importante è quella dell'uranio perchè ad essa appartiene il radio. Di tutte e tre le famiglie l'ultimo prodotto è il piombo; però i tipi di piombo ottenuto, pur avendo le stesse proprietà fisico-chimiche, presentano una leggera differenza nel peso atomico.

La disintegrazione di una sostanza radioattiva si compie con una rapidità molto diversa, da una piccola frazione di secondo a qualche miliardo di anni. Per ciascun elemento tale rapidità è però costante e non è affatto influenzata da condizioni estrinseche.

327. Radiumterapia. — Per finire, aggiungiamo che i raggi emessi dalle sostanze radioattive, possono provocare delle pericolose bruciature e delle gravi lesioni. Ma un'azione regolata con cura può portare alla guarigione di diversi tumori. Per il trattamento del cancro si utilizzano i raggi γ; la sostanza radioattiva viene chiusa in un tubo di platino che arresta i raggi α e β e una parte dei γ, quelli che hanno maggior lunghezza

d'onda. Tutta la regione cancerosa è esposta ai raggi γ per tutto il tempo necessario per la divisione delle cellule del tessuto. L'azione va però attentamente dosata e sorvegliata da uno specialista.

Meteore elettriche.

328. Elettricità atmosferica. — La Terra è un corpo conduttore, e possiede della elettricità distribuita solo alla sua superficie. L'aria invece è un corpo isolante, e può quindi essere elettrizzata nella sua massa. L'atmosfera costituisce un *campo elettrico* dovuto e all'elettricità distribuita sulla Terra e a quella posseduta dall'aria, o che può trovarsi al disopra dell'atmosfera stessa.

Non sono ancora sicuramente note le cause delle cariche elettriche alla superficie terrestre e nell'atmosfera. Le prove fatte per dimostrare che l'evaporazione è una sorgente di elettricità, come aveva pensato il Volta, non sono state conclusive e talora sono apparse contradditorie.

Pare che nell'esistenza della elettricità della Terra e dell'aria una parte importante la abbiano le radiazioni solari a piccola lunghezza d'onda, che producono facilmente fenomeni di ionizzazione.

In ogni modo è certo che esiste una larga serie di fenomeni capaci di sviluppare continuamente della elettricità, che si distribuisce sulla superficie della Terra e nella massa dell'atmosfera.

Accenniamo ancora che la conducibilità elettrica dell'aria è debolissima negli strati inferiori, ma aumenta coll'altezza, tanto che a un centinaio di chilometri dal suolo viene ammessa l'esistenza di uno strato d'alta conducibilità, paragonabile a quella dei metalli, detto *strato di Heaviside*, che gode tanta importanza nelle radio-trasmissioni (317).

329. Temporali. — L'elettricità delle nubi oltre aver origine, com'è stato esposto, per il contatto tra l'aria e le goccioline che si formano per la condensazione del vapore d'acqua, e che costituiscono le nubi stesse, può anche essere prodotta per il fenomeno d'induzione. Una nube posta nel campo ter-

restre si elettrizza, di solito positivamente nella parte inferiore guardante il suolo, che è carico negativamente, e negativamente nella regione superiore. Se allora per qualche ragione si rompe in parti, ciascuna di queste possederà una sola specie di elettricità, qualcuna positiva, tal'altra negativa.

Si comprende allora che possa prodursi una scarica sotto forma di scintilla tra due nubi a diverso potenziale o tra una nube e il suolo. Tale scarica è detta *fulmine* e si dice *lampo* la luce della scintilla; il rumore è il *tuono*.

Udito da vicino il rumore della scarica apparisce come un colpo secco paragonabile a quello prodotto da una esplosione ordinaria; ma a una certa distanza apparisce come un rombo prolungato, specialmente per effetto dell'eco prodotta dalla riflessione del suono sulle nubi o sul suolo. L'aspetto della scarica atmosferica è in tutto e per tutto, salvo le dimensioni, identico a quello delle scariche ottenute in laboratorio.

La quantità di elettricità messa in gioco nelle scariche atmosferiche non è molto rilevante, misurata in coulomb, ma data la brevissima durata del fenomeno, che non supera un millesimo di secondo, l'intensità della corrente è assai elevata. Con adatte misure si ottennero valori compresi fra 10 mila e 20 mila ampère.

Poichè la velocità del suono nell'aria si aggira intorno ai 333 m. al secondo, basta dividere per 3 il numero dei secondi decorrenti fra l'apparizione del lampo e l'istante in cui si comincia a udire il tuono, per ottenere la distanza in chilometri della nube temporalesca.

È stata anche misurata la lunghezza dei lampi che in certi casi è apparsa di 10 o 15 km.

In quanto agli effetti del fulmine, accenneremo che sono gli stessi, sebbene in scala maggiore, di quelli ottenuti con le scariche di laboratorio e che colpiti dal fulmine sono prevalentemente gli oggetti più elevati e in buona comunicazione col suolo; in campagna, più di tutti, gli alberi. A tal proposito la statistica ha fatto delle constatazioni curiose: gli alberi più colpiti sono i pioppi, poi le querce e gli abeti, in ultimo vengono i faggi e gli ontani. Tali differenze possono dipendere sia dalla diversa natura del legno, sia dalle dimensioni delle

radici e dalla loro profondità; infatti il pero che ha delle radici più profonde del melo, pur essendo della stessa famiglia, è molto più soggetto adessere colpito dal fulmine.

330. **Parafulmini.** — L'uomo incapace di influire menomamente sullo svolgersi dei fenomeni elettrici atmosferici, tenta di difendersi dagli effetti spesso mortali dei fulmini coi parafulmini.

Il *parafulmine* ad asta — *parafulmine di Franklin* — è (fig. 493) formato di un'asta di ferro alta da 5 a 10 metri, terminata all'estremo superiore con una punta conica di rame dorato, fissata verticalmente sull'edifizio che si vuol proteggere. La sua estremità inferiore è congiunta con la Terra mediante un conduttore di ferro senza interruzione, che segue il tetto ed i muri dell'edifizio.

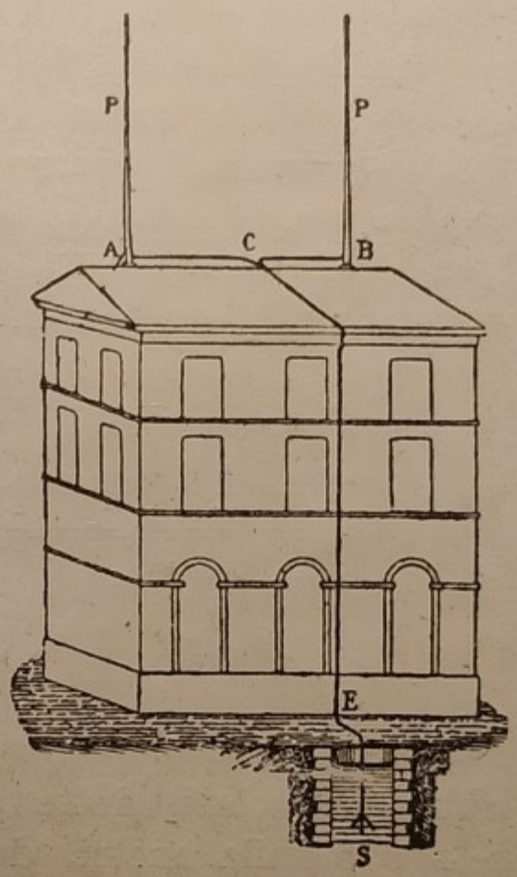


Fig. 493.

Pare che tale parafulmine abbia principalmente un effetto preventivo; infatti la punta del parafulmine si carica per induzione quando una nube elettrizzata gli passi sopra, e in tal caso l'elettricità di nome contrario della punta sfugge sulla nube e la neutralizza. La sfuggita di elettricità dalla punta dell'asta spesso di notte apparisce manifesta sotto forma di un fiocco o di una stella luminosa sormontante la punta, eguali al *fuoco di Sant'Elmo*, osservato dai marinai sugli alberi dei bastimenti.

Ma se il disquilibrio elettrico fra la nube e l'asta avviene troppo rapidamente, così che la sfuggita di elettricità dalla punta non abbia tempo di compiersi, il fulmine colpisce l'asta e la scarica si porta con grande probabilità al suolo attraverso il conduttore.

Dati però certi caratteri della scarica atmosferica, sui quali non possiamo entrare, avviene non di rado che la scarica

invece di seguire il conduttore che unisce il parafulmine a suolo, attraversi l'edifizio con gravissimo danno. Ciò posto il mezzo più sicuro di protezione sarebbe quello di chiudere tutto l'edifizio in una specie di gabbia metallica.

È ciò che si è tentato di realizzare lontanamente col *parafulmine a rete* o *parafulmine Melsens* (fig. 494). Esso è formato da un gruppo di conduttori orizzontali e verticali che inviluppano l'edifizio, per così dire, in una rete a larghe maglie; il sistema termina sul tetto con dei pennacchi *ABCD* formati di piccole punte metalliche, e i conduttori verticali comunicano con la Terra. Tale sistema protegge l'edifizio come la gabbia di Faraday proteggeva dalle azioni elettriche esterne un elettroscopio che vi si trovava contenuto (226).

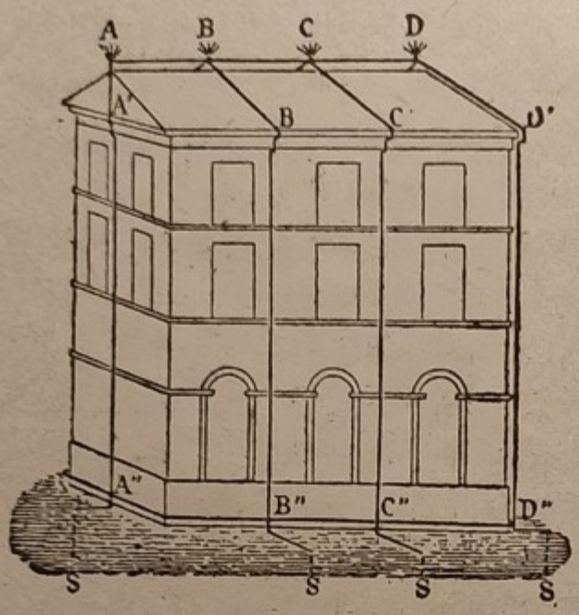


Fig. 494.

331. Formazione della grandine. — La grandine si forma in nubi particolari, dette *cumulo-nembi*, che possono salire a a 4 o 5 mila metri, dove nei nostri climi anche d'estate la temperatura è certo inferiore a zero. In tali condizioni le goccioline d'acqua portate in su dai cumulo-nembi possono rimanere soprafuse, vale a dire liquide sebbene a temperatura sotto zero. Ma il loro urto contro i cristallini di ghiaccio, che si trovano spesso a tale altezza, ne può provocare la solidificazione, formandosi in conseguenza quegli ammassi di cristallini di ghiaccio che costituiscono i cirri, nubi a filamenti, accompagnanti spesso i cumulo-nembi. La corrente ascendente porta continuamente altre goccioline soprafuse a contatto con tali cristallini e le goccioline si solidificano formando dei chicchi di dimensioni apprezzabili che per il loro peso discendono. Durante il moto di discesa nuove goccioline soprafuse si attaccano ai chicchi solidificando alla loro superficie e ingrossandoli. A questo punto spesso avviene un altro fatto: i chicchi entrano in rapidi vortici d'aria ad asse orizzontale e sono costretti

a risalire e a ridiscendere parecchie volte passando e ripassando più volte attraverso la nube formata di goccioline soprafuse. Il risultato è che ad ogni salita e discesa attorno al chicco primitivo si forma uno straterello di ghiaccio, di modo che il chicco presenta una struttura a strati più o meno completi e regolari. I chicchi più grossi spesso sono ricoperti da uno strato di cristalli di ghiaccio assai regolari.

Il Volta opinava che i nuclei primitivi di ghiaccio, trovandosi compresi fra due nubi elettrizzate di segno contrario, fossero alternativamente attirati e respinti, oscillando, per così dire, fra una nube e l'altra. Durante tali oscillazioni i nuclei s'ingrosserebbero per il depositarsi su di essi del ghiaccio, proveniente dalla solidificazione delle goccioline in soprafusione incontrate, fino a che il peso dei chicchi fosse risultato superiore alle forze elettriche attive per determinarne la caduta. Tale ipotesi, che in verità si accorda colla ipotesi prima esposta riguardo al meccanismo della formazione dei chicchi, non è però accettabile poichè le forze elettriche attive sono sempre estremamente deboli e incapaci di far salire anche di pochi decimetri dei chicchi anche assai piccoli. Inoltre durante i temporali non si riscontrano quasi mai le due nubi, ma ne esiste una sola dentro la quale si forma la grandine.

Infine va notato che grandine e tuono, sebbene sieno ambedue una manifestazione accessoria dello svilupparsi d'un cumulo-nembo, sono fenomeni affatto indipendenti: può tuonare senza che si abbia la grandine o inversamente. Per tali ragioni non è logico attribuire all'elettricità atmosferica alcuna importanza nella formazione della grandine.

332. Aurore boreali. — Sono manifestazioni luminose comunissime tanto nelle regioni artiche che in quelle antartiche, ma furono chiamate *boreali* da Pietro Gassendi quando ancora non si conoscevano le aurore australi. Tra i paesi abitati la Norvegia si trova nelle migliori condizioni per lo studio delle aurore.

L'aspetto del fenomeno è variabilissimo, le aurore boreali avendo ora struttura raggiata, ora presentando degli archi o forme le più bizzarre con colori di luce variabilissimi.

Le ipotesi per la loro spiegazione sono diverse, ma le più recenti si accordano attribuendone la causa ai raggi catodici sempre e talora molto abbondantemente emessi dal Sole. Tali raggi sono emessi dalle macchie solari e dalla regione circostante, così almeno si crede per la coincidenza frequente fra le grandi aurore boreali colla apparizione di un notevole gruppo di macchie verso il centro del Sole. Si sa che i raggi catodici sono elettroni in moto (285); gli elettroni lanciati dal Sole viaggiano nello spazio interplanetario con una velocità che si calcola essere 1110 chilometri al secondo e arriverebbero quindi alla Terra, distante circa 150 milioni di chilometri, in 45 ore.

Arrivati in prossimità del nostro pianeta, gli elettroni sono obbligati a curvare la loro traiettoria per l'azione del campo magnetico terrestre e colpendo l'atmosfera rarefatta nelle alte regioni vi destano il fenomeno luminoso delle aurore, come gli elettroni destano la luminosità nei nostri tubi da laboratorio contenenti un gas rarefatto.

Notevoli sono gli studi fatti sull'argomento dagli scienziati Birkeland e Stoermer.

Conclusione.

Il progresso scientifico ha preso negli ultimi tempi un ritmo vertiginoso. Data da poco più di un secolo la scoperta della pila di Volta, e da quell'epoca memorabile s'inizia una rapida corsa verso le più grandi conquiste nel campo fisico. Enumeriamone le principali.

L'elettromagnetismo che ha origine dalla scoperta del danese Oersted (1820) e si perfeziona cogli studi dei francesi Ampère ed Arago.

La prima dinamo Gramme (1870), nella quale però l'indotto era l'anello che Pacinotti fece conoscere nel 1863.

La scoperta del telefono (1876), detto telefono Bell, ma inventato dal livornese Meucci.

La prima lampada a incandescenza, veramente pratica, scoperta dall'americano Edison (1878).

Il campo magnetico rotante del nostro Galileo Ferraris (1885), che rivoluzionò l'Elettrotecnica e rese possibile il trasporto dell'energia a grandi distanze.

Le onde elettriche dimostrate sperimentalmente la prima volta dal tedesco Herz nel 1889.

I raggi X scoperti dal fisico tedesco Röntgen sullo scorcio del 1895.

Gli studi del Righi e le prime esperienze del Marconi (1896), il quale con una genialità unica e con un lavoro dei più tenaci ci portò alle meraviglie della Telegrafia senza fili.

In questa gara feconda a cui partecipano gli intelletti più alti di tutte le Nazioni, è argomento di compiacenza e di legittimo orgoglio rilevare come l'Italia sia degnamente rappresentata dai suoi migliori Scienziati, i quali fanno pubblica testimonianza della nostra operosità in tutti i rami dello scibile.

Introduzione

1. Ese

3. Stati

Cinematica

5. Tr

formem

Statica .

8. Co

9. Equi

lele. -

12. Equ

- 14. G

librio

nella r

e stab

Dinamica

20.

- 22. I

di ca

leggi

28. S

unità

forza

INDICE

INTRODUZIONE

Introduzione . . . . . *Pag.* 1

1. Esempi di fenomeni fisici. - 2. Rappresentazioni grafiche. - 3. Stati di aggregazione. - 4. Proprietà generali della materia.

MECCANICA

Cinematica . . . . . » 11

5. Traiettoria. - 6. Moto uniforme e vario. - Moto uniformemente vario. - 7. Composizione dei movimenti.

Statica . . . . . » 18

8. Concetto di forza: equilibrio: unità statica di forza. - 9. Equilibrio di forze nei casi più semplici. - 10. Forze parallele. - 11. Decomposizione di una forza in due complanari. - 12. Equilibrio di corpi con un punto o un asse fisso. - 13. Coppia. - 14. Gravità; baricentro. - 15. Equilibrio dei gravi. - 16. Equilibrio statico di meccanismi semplici; leva, puleggia, asse nella ruota. - 17. Piano inclinato, cuneo, vite. - 18. Bilancia e stadera. - 19. Altre applicazioni della leva e della vite.

Dinamica . . . . . » 54

20. Inerzia. - 21. Proporzionalità fra forza e accelerazione. - 22. Unità dinamica di forza. - 23. Azione e reazione. - 24. Moto di caduta dei gravi. - 25. Pendolo semplice. - 26. Verifica delle leggi del pendolo. - 27. Misura dell'accelerazione della gravità. 28. Applicazione del pendolo agli orologi. - 29. Moto circolare uniforme. - Forza centripeta e centrifuga. - 30. Effetti della forza centrifuga e applicazioni.

Lavoro - Energia - Potenza . . . . . *Pag.* 76

31. Lavoro meccanico. - 32. Lavoro motore e resistente. - 33. Unità di lavoro. - 34. Energia. - 35. Potenza. - 36. Equilibrio dinamico nelle macchine. - 37. Attrito e resistenza del mezzo. - 38. Trasformazione e conservazione dell'energia.

Proprietà principali dei solidi . . . . . » 87

39. Tenacità, durezza. - 40. Elasticità.

Meccanica dei liquidi . . . . . » 88

41. Proprietà principali dei liquidi. - Pressione. - 42. Compressibilità dei liquidi. - 43. Trasmissione della pressione nei liquidi. - 44. Torchio idraulico. - 45. Pressioni dal basso in alto. - 46. Pressione idrostatica sul fondo e sulle pareti di un vaso. - 47. Vasi comunicanti. - 48. Applicazioni del principio dei vasi comunicanti. - 49. Principio di Archimede. - 50. Equilibrio dei galleggianti. - 51. Navi e battelli sommergibili.

Applicazione dei principî dell'idrostatica per la misura della densità . . . . . » 108

52. Densità e peso specifico. - 53. Aerometri a peso costante. - 54. Densità delle sostanze più comuni. - 55. Livella a bolla.

Meccanica dei gas . . . . . » 115

56. Proprietà principali dei gas. - 57. Pressione atmosferica. - 58. Effetti della pressione atmosferica. - 59. Principio di Archimede nei gas. - 60. Barometri a mercurio. - 61. Barometri metallici. - 62. Usi del barometro. - 63. Leggi di Boyle e Mariotte. - 64. Manometro.

Pompe . . . . . » 133

65. Pompa universale. - 66. Pompa da bicicletta. - 67. Macchina pneumatica. - 68. Applicazioni della macchina pneumatica e dei compressori. - 69. Pompe idrauliche. - 70. Moto di un solido in un fluido (navi, dirigibili, velivoli).

Azioni molecolari . . . . . » 149

71. Coesione e adesione. - 72. Adesione fra solidi, fra solidi e liquidi, fra solidi e gas. - 73. Diffusione; osmosi; dialisi. - 74. Fenomeni di capillarità. - 75. Viscosità.

TERMOLOGIA

Misura delle temperature . . . . . *Pag.* 157

76. Calore e temperatura. - 77. Termometri e scale termometriche. - 78. Termometri a massima e a minima.

Dilatazione . . . . . » 162

79. Dilatazione termica dei solidi. - Dilatazione lineare. - 80. Dilatazione cubica. - 81. Variazione della densità con la temperatura. - 82. Dilatazione dei liquidi. - 83. Dilatazione dell'acqua. - 84. Dilatazione dei gas. - 85. Temperatura assoluta. - 86. Teoria cinetica dei gas.

Calorimetria . . . . . » 169

87. Quantità di calore; caloria. - 88. Capacità termica e calore specifico. - 89. Risultati generali relativi ai calori specifici dei solidi e dei liquidi. - 90. Importanza dell'elevata capacità termica dell'acqua.

Propagazione del calore . . . . . » 172

91. Conduttività. - 92. Proprietà delle reti metalliche. - Lampada di sicurezza. - 93. Calorifughi. - 94. Irradiazione. - 95. Convezione o trasporto del calore.

Cambiamenti di stato . . . . . » 177

96. Fusione e leggi. - 97. Cambiamento di volume durante la fusione. - 98. Variazione del punto di fusione colla pressione. - 99. Solidificazione e surfusione. - 100. Fusione delle leghe. - 101. Calore di fusione. - 102. Evaporazione. - 103. Tensione massima del vapore d'acqua. - 104. Tensione massima di altri vapori. - 105. Ebollizione. - 106. Influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione. - 107. Calore di vaporizzazione. - 108. Liquefazione. - Temperatura critica. - 109. Freddo prodotto dall'evaporazione di un liquido. - 110. Usi industriali dei gas liquefatti.

Igrometria . . . . . » 194

111. Umidità dell'aria. - 112. Psicrometro. - 113. Igroscopî.

Cenni di Termodinamica . . . . . » 196

114. Trasformazione reciproca del lavoro e del calore; 1° Principio della termodinamica. - 115. Equivalente meccanico della caloria. - 116. Ritorno al principio della conservazione dell'energia.

Motori termici e macchine refrigeranti . . . . . *Pag.* 199

117. Macchine a vapore. - 118. Cilindro. - 119 Condensatore. - 120. Cenno sulle turbine a vapore. - 121. Rendimento d'una macchina a vapore. - 122. Motori a scoppio. - 123. Macchine refrigeranti.

Riscaldamento e ventilazione degli ambienti abitati e industriali » 211

124. Apparecchi di riscaldamento. - 125. Ventilazione.

ACUSTICA

Acustica . . . . . » 217

126. Vibrazione dei corpi elastici. - 127. Propagazione dei moti vibratori. - Velocità di trasmissione. - 128. Meccanismo di propagazione. - Onde sonore. - 129. Suoni puri. - 130. Frequenza e sua misura. - 131. Limiti dei suoni percettibili. - 132. Lunghezza d'onda. - 133. Intensità. - 134. Tubi, cornetti acustici, portavoce. - 135. Suoni complessi; loro timbro; rumori. - 136. Riflessione del suono. - 137. Eco. - 138. Percezione dei suoni: l'orecchio. - 139. Fenomeni di risonanza. - 140. Intervalli musicali. - 141. Scale musicali. - 142. Cenno sulla riproduzione dei suoni.

OTTICA

Ottica . . . . . » 249

143. Propagazione della luce. - 144. Ombre. - 145. Velocità della luce nel vuoto e nei mezzi materiali.

Fotometria . . . . . » 253

146. Intensità luminosa. - Legge di Keplero. - 147. Fotometro Bunsen. - 148. Campioni di luce. - 149. Intensità di illuminazione. - 150. L'illuminazione varia coll'inclinazione dei raggi.

Riflessione della luce . . . . . » 257

151. Leggi della riflessione. - 152. Specchi piani. - 153. Specchi ad angolo. - 154. Riflessione irregolare o diffusione. - 155. Specchi sferici. - 156. Specchi sferici concavi. - Fuoco principale. - 157. Specchi ustori. - 158. Fuochi coniugati. - 159. Immagine di un oggetto. - 160. Verifiche sperimentali. - 161. Specchi sferici convessi. - Fuoco. - Immagini. - 162. Aberrazioni di sfericità. - Specchi parabolici.

Rifrazione della luce . . . . . *Pag.* 273

163. Rifrazione e sue leggi. - 164. Indice di rifrazione. - 165. Angolo limite. - Riflessione totale. - 166. Prismi a riflessione totale. - 167. Lastra e prisma. - 168. Lenti. - 169. Rifrazione di un fascio di raggi incidenti paralleli all'asse principale. - Fuochi. - 170. Immagini prodotte dalle lenti convergenti. - 171. Immagini prodotte dalle lenti divergenti. - 172. Ingrandimento di una lente. - 173. Applicazioni delle lenti. - 174. Dispersione della luce. - 175. Lenti acromatiche.

Strumenti ottici . . . . . » 290

176. L'occhio e il meccanismo della visione. - 177. L'occhio normale. - Ametropie. - 178. Persistenza delle immagini sulla retina. - 179. Visione binoculare. - Sensazione del rilievo. - 180. La visione dei colori. - 181. Colori dei corpi. - 152. Apparecchio fotografico. - 183. Apparecchio di proiezione. - 184. Cinematografo. - 185. Lente d'ingrandimento o microscopio semplice. - 186. Microscopio composto. - 187. Cannocchiale astronomico. - 188. Cannocchiale di Galileo. - 189. Cannocchiale a prismi. - 190. Telescopio.

Spettroscopia . . . . . » 311

191. Modo di ottenere uno spettro puro. - 192. Spettro scopio. - 193. Differenti specie di spettri. - 194. Analisi spettrale. - 195. Assorbimento delle radiazioni luminose. - 196. Spettro solare. - 197. Radiazioni non visibili. - 198. Fotografia. - 199. Natura della luce. - 200. Frequenza e lunghezza d'onda di una radiazione semplice.

Cenno sulle principali meteore luminose . . . . . » 327

201. Rifrazione atmosferica e miraggio. - 202. Arcobaleno.

ELETTROLOGIA E MAGNETISMO

Fenomeni principali di Magnetostatica . . . . . » 333

203. Calamite naturali e artificiali. - 204. Differenza fra i poli di una calamita. - 205. Calamita spezzata. - 206. Leggi delle azioni magnetiche. - 207. Permeabilità magnetica. - 208. Campo magnetico. - 209. Linee di forza. - 210. Induzione magnetica. - 211. Spettri magnetici. - 212. Schermi magnetici. - 213. Flusso magnetico. - 214. Campo magnetico

terrestre. - 215. Meridiano magnetico; declinazione e inclinazione magnetiche. - 216. Variazione degli elementi magnetici terrestri. - 217. Bussola terrestre e marina.

Fenomeni principali di Elettrostatica . . . . . *Pag.* 351

218. Elettrizzazione per strofinio. - 219. Buoni e cattivi conduttori dell'elettricità. - 220. Due specie di elettricità. - 221. Elettroscopio a foglie d'oro. - 222. Leggi delle azioni elettriche. - Unità di elettricità. - 223. Campo elettrico. - 224. Potenziale elettrico. - 225. Significato fisico del potenziale. - Unità di potenziale. - 226. Distribuzione della elettricità sui conduttori. - 227. Densità elettrica superficiale. - 228. Potere delle punte. - 229. Induzione elettrostatica. - 230. Capacità elettrica. - 231. Condensatori e leggi della condensazione elettrica. - 232. Varie forme di condensatori. - 233. Elettroscopio condensatore di Volta.

Macchine elettrostatiche . . . . . » 366

234. Macchina di Ramsden. - 235. Elettroforo di Volta. - 236. Macchina di Wimshurst.

Elettrodinamica . . . . . » 370

237. La corrente elettrica. - 238. Intensità della corrente. - 239. L'effetto Volta. - 240. Spiegazione dell'effetto Volta. - Teoria elettronica. - 241. Leggi di Volta sulla elettricità di contatto. - 242. Elemento voltaico. - 243. Come funziona l'elemento voltaico. - 244. Unione di più elementi in serie. - Pila. - 245. Senso della corrente. - 246. La pila a colonna. - 247. Modello idraulico della pila.

La corrente negli elettroliti . . . . . » 380

248. Dissociazione elettrolitica. - 249. Regola fondamentale della elettrolisi. - 250. Azioni secondarie. - 251. Elettrolisi dell'acqua. - 252. Leggi della elettrolisi. - 253. Ampère legale o internazionale. - 254. Affinamento elettrolitico del rame. - Elettrometallurgia. - 255. Galvanostegia. - 256. Galvanoplastica. - 257. Polarizzazione. - Pila Leclanché. - 258. Accumulatori elettrici. - 259. Usi degli accumulatori.

Leggi della corrente elettrica . . . . . » 393

260. Concetto di resistenza elettrica. - Unità di resistenza. - 261. Cassette di resistenza. - 262. Misura di una resistenza. - 263. Leggi della resistenza di un conduttore filiforme. - 264. Prima legge di Ohm. - 265. Seconda legge di Ohm. - 266. Circuiti derivati. - 267. Conduttori in serie. - 268. Reostati.

Effetto termico della corrente . . . . . *Pag.* 401

269. Legge di Joule. - 270. Lampade elettriche a incandescenza. - 271. Lampade elettriche ad arco. - 272. Altre applicazioni dell'effetto Joule.

Correnti termoelettriche . . . . . » 407

273. Coppia termoelettrica Seebeck. - 274. Pile termoelettriche.

Elettromagnetismo . . . . . » 409

275. Campo magnetico di una corrente rettilinea. - 276. Campo magnetico di una corrente circolare. - 277. Campo magnetico di un solenoide. - 278. Elettrocalamite.

Strumenti di misura . . . . . » 417

279. Galvanometri. - 280. Amperimetri e voltmetri. - 281. Energia e potenza di una corrente. - Wattmetri.

La corrente negli aeriformi . . . . . » 423

282. Ionizzazione nei gas. - 283. Scintilla nell'aria. - 284. Scariche nei gas rarefatti. - 285. Raggi catodici. - 286. Raggi X. - 287. Fenomeni termoionico e fotoelettrico.

Induzione elettromagnetica . . . . . » 436

288. Estensione del concetto di flusso di forza. - 289. Legge fondamentale dell'induzione elettromagnetica. - 290. Legge di Lenz. - 291. Legge di Neumann. - 292. Rocchetto di Ruhmkorff. - 293. Autoinduzione. - 294. Correnti di Foucault.

Correnti alternate . . . . . » 447

295. Corrente alternata semplice o monofàse. - 296. Corrente trifàse.

Macchine generatrici di corrente . . . . . » 449

297. Dinamo elettriche. - 298. Eccitazione nelle dinamo. - 299. Alternatore monofàse. - 300. Alternatore trifàse.

Motori elettrici . . . . . » 456

301. Motori a corrente continua. - 302. Alternomotori. - Campo rotante Ferraris.

Trasformatori - Produzione e distribuzione dell'energia elettrica . . . . . *Pag.* 459

303. Trasformatori rotativi. - 304. Trasformatori statici. - 305. Centrali elettriche. - 307. Trasporto e distribuzione dell'energia elettrica.

Telegrafo e telefono . . . . . » 465

307. Campanello elettrico. - 308. Telegrafo elettrico. - 309. Trasmissione dei segnali. - 310. Linee telegrafiche. - 311. Telefono magnetico. - 312. Microfono. - 313. Cenno sulle centrali telefoniche.

Onde elettromagnetiche . . . . . » 474

314. Cenno sulla teoria elettromagnetica della luce. - 315. Produzione di onde elettromagnetiche. - 316. Il coherer.

Radiotelegrafia e radiotelefonia . . . . . » 478

317. I primi esperimenti. - 318. Stazione radiotelegrafica trasmettente. - 319. Stazione ricevitrice. - 320. Altri rivelatori. - 321. Radiotelefonia.

Unità elettriche . . . . . » 487

322. Unità pratiche.

Costituzione della materia e fenomeni radioattivi . . . . » 488

323. Costituzione della materia. - 324. Radioattività. - 325. Radiazioni emesse dai corpi radioattivi. - 326. Disintegrazione radioattiva. - 327. Radiumterapia.

Meteore elettriche . . . . . » 493

328. Elettricità atmosferica. - 329. Temporali. - 330. Parafulmini. - 331. Formazione della grandine. - 332. Aurore boreali.

Conclusione . . . . . » 498

de del.

» 465

ico. .
che. .
o sulle

» 474

5. Pro-

» 478

rafica
ivela-

» 487

» 488

à. .
isin-

» 493

ra-
ore

498

L. 18,90 (nette)